

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Bojan Krsnik

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Bojan Krsnik

Zagreb, 2010.

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad preddiplomskog studija na temu "Otpornost na trošenje modificiranih slojeva" izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Za stručnu pomoć pri izradi rada, odabiru literature, korisne savjete, zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Franji Cajneru, te doc. dr. sc. Darku Landeku, laborantu Romanu Divjaku, laborantici Mateji Šnajdar i laborantici Nadi Vargi.

Sažetak

U radu je ispitivan utjecaj postupaka modificiranja površina na otpornost na trošenje, mehanizmima abrazije i adhezije. Od niza postupaka modificiranja površina prikladnih za stvaranje površinskih slojeva izabrani su postupci nitrokarburiranja, nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom, boriranja i vanadiranja. Otpornost na trošenje ovih slojeva uspoređena je s otpornošću na trošenje poboljšanog čelika C45, koji je služio i kao podloga (substrat) za navedene slojeve. Na temelju triboloških ispitivanja, ispitivanja faktora trenja, ispitivanja mikrotvrdoće i analize mikrostrukture površinski slojevi rangirani su prema otpornosti na abrazijsko, odnosno adhezijsko trošenje.

Sadržaj

Sažetak	I
Popis slika	IV
Popis tablica	VI
Popis oznaka i mjernih jedinica	VII
1. Uvod	1
TEORIJSKI DIO	
2. Mehanizmi trošenja i otpornost na trošenje.....	3
2.1 Abrazija.....	3
2.2 Adhezija.....	4
3. Postupci modificiranja i prevlačenja površina.....	6
4. Toplinsko – kemijski postupci modificiranja površina.....	8
4.1 Nitiranje i nitrokarburiranje.....	8
4.1.1 Osnovni postupci nitiranja i nitrokarburiranja.....	8
4.1.2 Nastanak i svojstva nitiranog sloja.....	10
4.1.3 Nitrokarburiranje postupcima Tenifer i Tenifer – QPQ.....	12
4.2 Boriranje.....	17
4.2.1 Osnovni postupci boriranja i primjena.....	17
4.2.2 Nastanak i svojstva boridnog sloja.....	19
4.3 Vanadiranje.....	23
4.3.1 Opis i primjena postupka vanadiranja.....	23
4.3.2 Nastanak i svojstva vanadiranog sloja.....	24
EKSPERIMENTALNI DIO	
5. Pokusi ispitivanja otpornosti na trošenje.....	27
5.1 Plan ispitivanja.....	27
5.1.1 Izbor materijala i izrada ispitnih uzoraka.....	27
5.1.2 Toplinska obrada uzoraka.....	29
5.2 Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata.....	30
5.2.1 Ispitivanje hrapavosti površina.....	30

5.2.2 Ispitivanje faktora trenja.....	31
5.2.2.1 Ispitivanje otpornosti na trošenje adhezijom.....	34
5.2.3 Ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom.....	38
5.2.4 Ispitivanje mikrotvrdoće i metalografska analiza.....	40
5.2.5 Rangiranje ispitanih slojeva prema otpornosti na trošenje.....	45
Zaključak.....	46
Literatura.....	47
Prilozi	

Popis slika

- Slika 1.** Jedinični događaj abrazije [2]
- Slika 2.** Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [2]
- Slika 3.** Mjesto pojave trenja klizanja i adhezijskog trošenja [2]
- Slika 4.** Shematski prikaz slojeva strukture površinskog sloja [3]
- Slika 5.** Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina [5]
- Slika 6.** Dijelovi mjenjačke kutije automobila obrađenih nitrokarburiranjem [7]
- Slika 7.** Pregled postupaka nitrokarburiranja [8]
- Slika 8.** Dijagram stanja sustava Fe-N [10]
- Slika 9.** Shematski prikaz raspodjele faza, te zone spojeva i difuzijske zone kod nitriranog i nitrokarburiranog čelika [12]
- Slika 10.** Raspored tvrdoće na nitriranom uzorku od čelika Č1220 (C15): Nitrirano u solnoj kupki Tenifer pri temperaturi 580 °C tijekom 2 sata, ohlađeno u vodi [6]
- Slika 11.** Tok krivulje tvrdoće u zoni difuzije nakon nitrokarburiranja [11] čelika: a) C15, b) 34Cr4
- Slika 12.** Prikaz osnovnih kemijskih reakcija u solnoj kupki TF1 [8]
- Slika 13.** Dijagram postupka nitrokarburiranja sa i bez naknadne oksidacije [10]
- Slika 14.** Shematski prikaz postrojenja za nitrokarburiranje Tenifer-/QPQ [8]
- Slika 15.** Automatizirano postrojenje za nitrokarburiranje Tenifer-/QPQ [13]
- Slika 16.** a) Koljenasto vratilo nakon procesa Tenifer-/QPQ [13]
b) Dijelovi za motor automobila (ventili, vođice ventila ...) nakon nitrokarburiranja Tenifer-/QPQ [13]
- Slika 17.** a) Primjer primjene procesa boriranja [14]
b). Dijelovi u industriji stakla nakon procesa boriranja [14]
- Slika 18.** Binarni sustav Fe-B po Hansenu [10]
- Slika 19.** Srednja dubina boridnih slojeva ovisna o vremenu boriranja u prašku Durborid 2 [10]
- Slika 20.** Tipovi boridnih slojeva (prema Kunstu i Schaaberu) [10]
- Slika 21.** Raspored tvrdoće na boriranom uzorku od čelika Č4751 [6]
- Slika 22.** Primjer primjene postupka vanadiranja (TD) [20]
- Slika 23.** Primjer primjene postupka vanadiranja (TD) [20]
- Slika 24.** Proces difuzijskog stvaranja vanadij karbida [21]
- Slika 25.** Kvantitativna mikroanaliza presjeka vanadiranog sloja i djelomično razugličene zone [21]
- Slika 26.** Promjene koncentracije ugljika u duplex postupku [21]
- Slika 27.** Dimenzije ispitnih uzoraka za planirano ispitivanje

Slika 28. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitanih uzoraka čelika C45

Slika 29. Vrijednosti faktora trenja kod različitih postupaka modificiranja površine bez primjene kaljenja i popuštanja

Slika 30. Faktor trenja uzoraka "O, 31, 41" prije i poslije naknadnog poboljšavanja

Slika 31. Histogram maksimalne širine traga trošenja uzoraka

Slika 32. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima nakon 60 s adhezijskih trošenja (0,1648 m) uz silu $F_t = 98,1$ N i brzinu okretanja kliznog prstena $n = 1,5$ °/min

Slika 33. Histogram maksimalne širine traga trošenja uzoraka nakon naknadnog HT

Slika 34. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima (nakon naknadnog poboljšavanja), nakon 60 s adhezijskih trošenja (0,1648 m) uz silu $F_t = 98,1$ N i brzinu okretanja kliznog prstena $n = 1,5$ °/min

Slika 35. Uređaj za ispitivanje materijala u uvjetima abrazije [22]

Slika 36. Vaga METTLER B5C 1000 [23]

Slika 37. Skup dijagrama ispitanih uzoraka na trošenje abrazijom

Slika 38. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom nitrokarburiranja Tenifer

Slika 39. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog nitrokarburiranjem s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer QPQ (AB1 390°C)

Slika 40. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom vanadiranja u solnoj kupci

Slika 41. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom boriranja u prašku

Popis tablica

Tablica 1. Nedostaci postupaka nitriranja [9]

Tablica 2. Sredstva za boriranje i karakteristike postupaka [11]

Tablica 3. Veličina zrna i svojstva EKABOR sredstva za boriranje u prašku [14]

Tablica 4. Osnovne karakteristike Fe-borida [6]

Tablica 5. Svojstva karbida u postupku vanadiranja [7]

Tablica 6. Kemijski sastav odabranog čelika C 45 (Č1531) [7]

Tablica 7. Ispitni uzorci i predviđena ispitivanja

Tablica 8. Parametri toplinske obrade

Tablica 9. Parametri poliranja

Tablica 10. Mikrostruktura ispitnih uzoraka obrađenih postupkom Tenifer, nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer QPQ, postupkom boriranja u prašku i postupkom vanadiranja u solnoj kupci, nagriženo sa 1% - tnm nitalom.

Tablica 11. Mehanička svojstva i otpornost na trošenje ispitanih slojeva

Popis oznaka i mjernih jedinica

F_n – normalna sila [N]
 F_t – tangencijalna sila [N]
 $^\circ$ – kut udara čestica (erozija)
 $A1$ – temperatura početka stvaranja austenitita [°C]
 μ – faktor trenja, 1
 HV – tvrdoća ispitana metodom Vickers
 E – modul elastičnosti [N/mm²]
 d – promjer [mm]
 t – vrijeme [s,h]
 s – put trošenja [mm]
 R_a, R_z, R_{ma_x}, R_q – parametri hrapavosti [μ m]
 ρ – gustoća [kg/m³]
 ϑ – temperatura [°C]

1. Uvod

Današnji strojni dijelovi i alati, vrlo su često izloženi složenim mehaničkim opterećenjima, trošenju i koroziji. Za ovo opterećenje u nizu primjera nije dovoljno samo kaljenje i popuštanje određenog čelika, već je nužno primijeniti i postupke modificiranja (i prevlačenja) površina. Njihova primjena ponekad prethodi, a ponekad slijedi osnovni postupak kaljenja i popuštanja. Od brojnih postupaka modificiranja površina u radu će se ispitivati, svojstva sljedećih industrijski dobro usvojenih postupaka:

- a) Kaljenje i popuštanje čelika C45 kao referentnog postupka toplinske obrade
- b) Nitrokarburiranje kaljenog i popušenog čelika C45 u solnoj kupci prema postupku TENIFER
- c) Nitrokarburiranje s naknadnom oksidacijom kaljenog i popušenog čelika C45 prema postupku TENIFER QPQ
- d) Boriranje u prašku, kaljenog i popušenog čelika C45
- e) Vanadiranje u solnoj kupci, kaljenog i popušenog čelika C45

U eksperimentalnom dijelu rada postavljen je plan pokusa s opisom parametara postupaka toplinske obrade i predviđenim ispitivanjima. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja otpornosti na trošenje, faktora trenja i mikrotvrdoće rubnog sloja uspoređeni su ispitivani slojevi i predložene njihov mogući izbor za slučajeve abrazijskog, odnosno adhezijskog trošenja.

TEORIJSKI DIO

2. Mehanizmi trošenja i otpornost na trošenje

Pod trošenjem smatramo postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [1].

Važno je i napomenuti da se mehanizmi trošenja opisuju jediničnim događajima, a on je slijed zbivanja koji dovodi odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. Jedinični događaj uključuje:

- Proces nastajanja pukotine,
- Proces napredovanja pukotine.

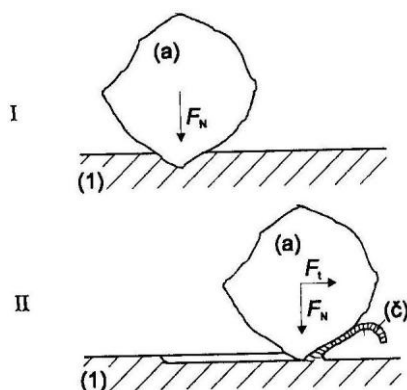
Danas različiti slučajevi trošenja sastavljeni od jednog ili više sljedećih osnovnih mehanizma trošenja:

- trošenje abrazijom,
- trošenje adhezijom,
- trošenje umorom površine,
- trošenje tribokorozijom.

2.1. Abrazija

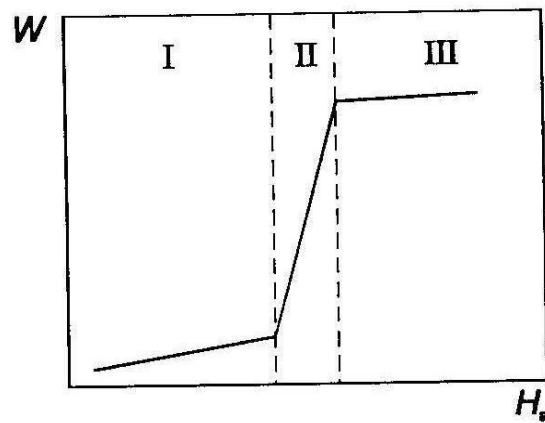
Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim čestima ili tvrdim izbočinama [2]. Opisuje se kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrijske oštrice, s dvije sljedeće faze vidljive na slici 1:

- Prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_n ,
- Istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č), pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .



Slika 1. Jedinični događaj abrazije [2]

Ovisnost abrazije o tvrdoći uobičajeno ima oblik "S" krivulje, slika 2, ovisno o odnosima tvrdoće abraziva i trošenog materijala.

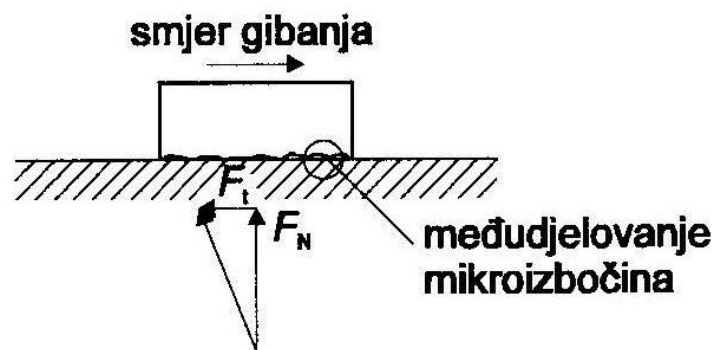


- I. Područje niskog trošenja, ako je $H_a < H_m$
- II. Prijelazno područje, ako je $H_a \approx H_m$
- III. Područje visokog trošenja, ako je $H_a > H_m$

Slika 2. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [2]

2.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje uzrokuju jednake sile koje mogu biti veličinom različite, od slabih sekundarnih do jakih primarnih sila. Ako su te sile jače od kohezijskih sila u materijalu, dolazi do trošenja. Adhezijsko trošenje (slika 3.) karakterizira prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju i proces zavarivanja čvrstih faza.



Slika 3. Mjesto pojave trenja klizanja i adhezijskog trošenja [2]

Kod trenja klizanja, koje nastaje između dva elemenata tribosustava, vrijede pravila [24]:

1. Sila trenja djeluje suprotno smjeru relativnog gibanja
2. Kod suhog dodira sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju

$$F_t = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

uz faktor trenja

$$\mu = F_t / F_N \quad (2)$$

3. Sila trenja ne ovisi o nominalnoj dodirnoj ploštini

Jedan od najutjecajnijih faktora koji utječu na adhezijsko trošenje je tip kristalne rešetke elemenata u tribosustavu. Pri tome vrijede sljedeće pravilo o kombinaciji kristalnih rešetki:

- FCC/FCC: najlošija kompatibilnost, tj. najjača adhezija,
- BCC/BCC, BCC/FCC: loša kompatibilnost, tj. jaka adhezija,
- HCP/HCP: daje najbolju kompatibilnost, tj. najslabija adhezija.

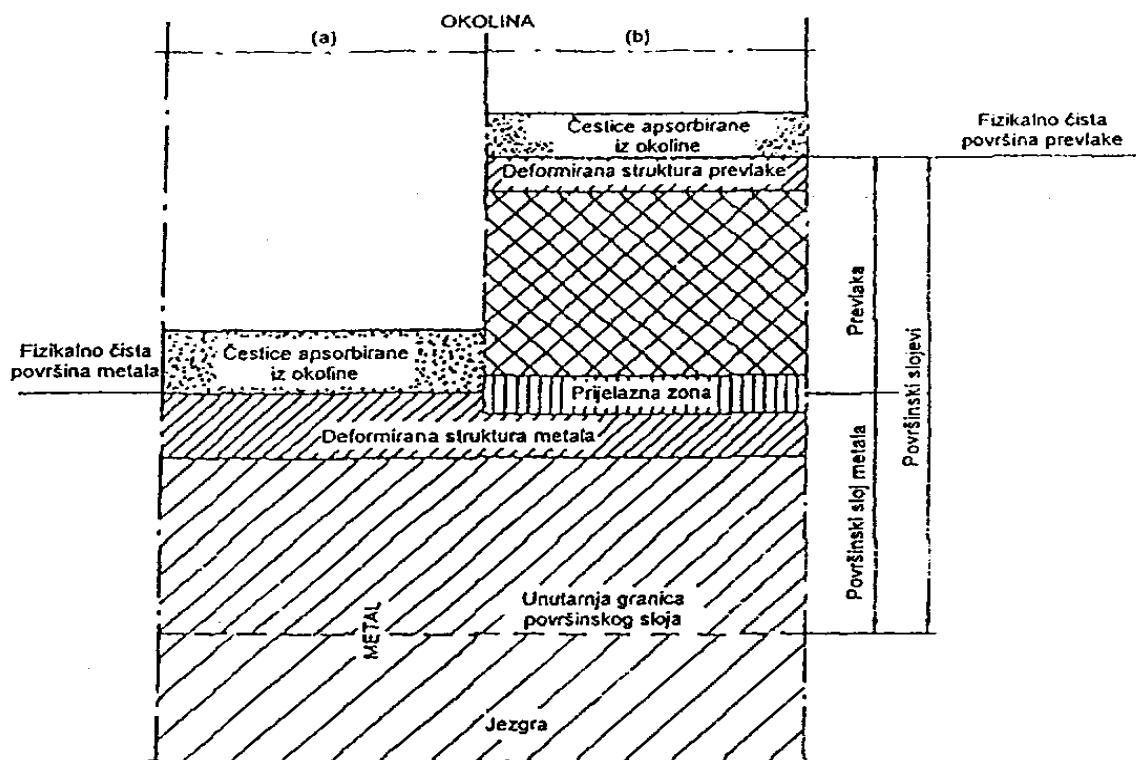
3. Postupci modificiranja i prevlačenja površina

Inženjerstvo površina, relativno je novo područje znanosti i "vrste" tehnologije. Dugi niz godina se pokušavalo dati jasnu definiciju inženjerstva površine, a danas se pod pojmom inženjerstvo površina podrazumijeva primjena tradicionalnih i inovativnih površinskih tehnologija za stvaranje sustava: površinski sloj – osnovni materijal (substrat), sa svojstvima različitim od svojstava osnovnog materijala i površinskog sloja. Nova svojstva sustava sloj – substrat moraju garantirati dobre eksploatacijske karakteristike uz prihvatljive proizvodne troškove" [3].

Osnovni aspekti inženjerstva površina su:

- Ispitivanje i utvrđivanje strukture i svojstava površine,
- Integritet površine,
- Postupci za promjenu sastava i mikrostrukture i svojstava površinskih slojeva.

Shematski prikaz strukture površinskog sloja osnovnog materijala, kakvim ga proučava inženjerstvo površina, vidljiv je na slici 7.



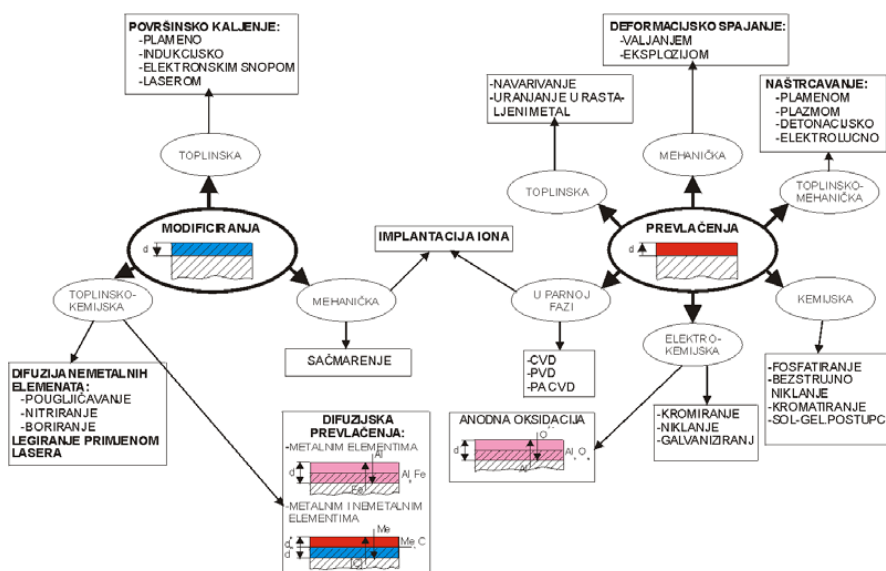
Slika 4. Shematski prikaz slojeva strukture površinskog sloja [3]

Iz slike 4. vidljivo je kako se formiraju površinski slojevi metala koji se sastoji od jezgre i površinskog sloja. Na dijelu (a) vidljiv je površinski sloj bez formirane prevlake koja je vidljiva na dijelu (b) slike 4. Tijekom toplinske obrade cijelog volumena (kaljenje, žarenje) na deformiranu i fizikalno čistu površinu metala (dio (a) na slici 7), adsorbiraju se čestice iz okoline i na njoj nastaju oksidi. Tijekom postupka modificiranja i prevlačenja površina na fizikalnoj čistoj površini metala stvara se dodatna prijelazna zona na koju se nanosi prevlaka. Čestice iz okoline spajaju se na površinu novonastale prevlake.

Kod procesa modificiranja površina dolazi do promjena cijele mikrostrukture metala (površine i jezgre predmeta). Na slici 5. vidi se osnovna podjela postupaka modificiranja i prevlačenja površina. Modificiranje površinskih slojeva metalnih materijala može se provesti primjenom postupaka koji se u osnovi razlikuju prema vanjskom djelovanju na površini obratka: mehaničko, toplinsko i toplinsko – kemijsko djelovanje [5]:

Mehaničkim unošenjem tlačnih naprezanja u površinski sloj metalnog materijala, dolazi do pomicanja i umnožavanja dislokacija u kristalnoj rešetci, što pridonosi povišenju otpornosti na trošenje i tvrdoće površine.

Unošenjem toplinske energije u površinski sloj strojnih dijelova izrađenih od čelika i željeznih ljevova omogućava se površinsko kaljenje. Kod njega se uz visoku gustoću toplinske energije i kratko trajanje procesa, ugrijavanje koncentrira samo na površinske slojeve. Toplinsko kemijsko modificiranje, uz unošenje **toplinske energije**, unose se i kemijski elementi, te se time mijenja kemijski sastav, mikrostruktura i svojstva površinskih slojeva. U strojogradnju, često se primjenjuju postupci cementiranja, nitiranja nitrokarburiranja, karbonitriranja, boriranja i sl.



Slika 5. Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina [5]

U radu će se primjenjivati postupci:

- nitrokarburiranja u solnoj kupci postupkom Tenifer,
- nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom u solnoj kupci postupkom Tenifer – QPQ
- boriranje u prašku,
- vanadiranje

4. Toplinsko-kemijski postupci modificiranja površina

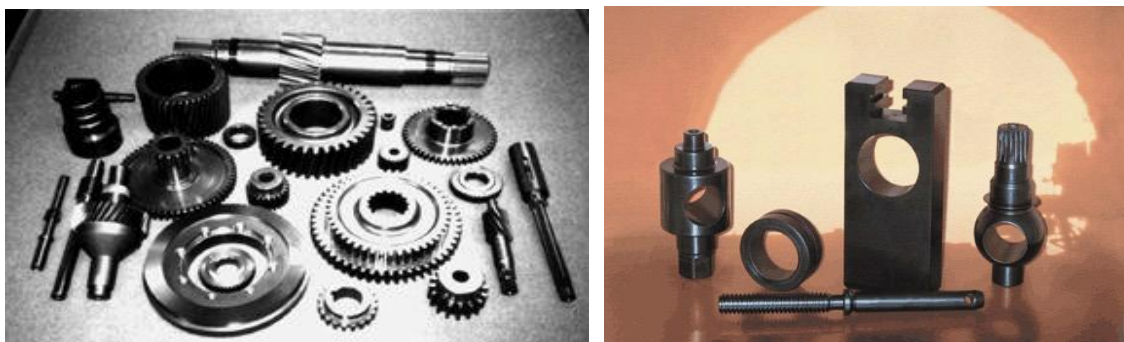
4.1 Nitiranje i nitrokarburiranje

4.1.1 Osnovni postupci nitiranja i nitrokarburiranja

Nitiranje i nitrokarburiranje su postupci termokemijske obradbe gdje se kod nitiranja površina obogaćuje dušikom, a kod nitrokarburiranja dušikom i ugljikom. Pri tom se na površini stvara zona spojeva, a ispod difuzijska zona. Nakon provođenja procesa nitiranja ili nitrokarburiranja dobit će se sljedeća svojstva [6]:

- povećana otpornost na trošenje,
- povišena površinska tvrdoća,
- postojanost prema višim temperaturama (550 – 550 °C),
- povećana dinamička izdržljivost,
- povećana korozijska postojanost,
- male ili nikakve deformacije,
- u manjoj mjeri smanjenje žilavosti u slučaju postupka Tenifer QPQ

Postupci nitiranja i nitrokarburiranja koriste se kod izrade osovina, zupčanika, ventila za hidrauliku i pneumatiku, dijelova pumpi, te kalupa za preradu polimera, kalupa za tlačni lijev, štanci, žigova, matrica za obradu deformacijom i sl. (slika 6)

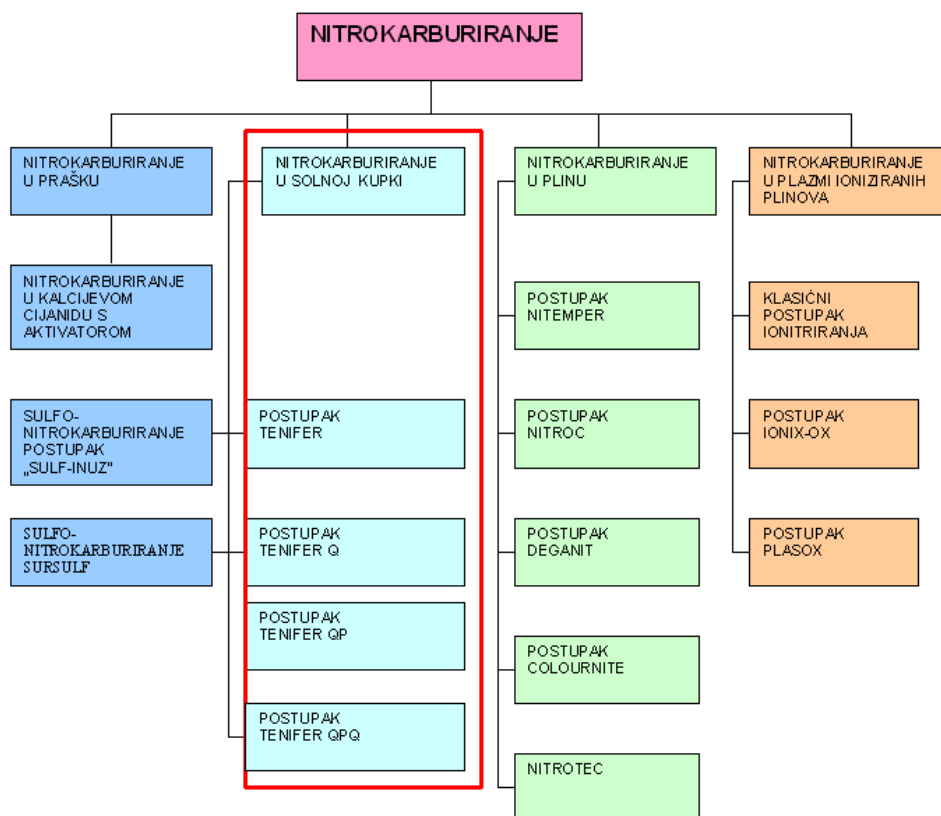


Slika 6. Dijelovi mjenjačke kutije automobila obrađeni nitrokarburiranjem [7]

Prema vrsti medija za nitiranje i nitrokarburiranje razlikuju se:

- Nitiranje u plinu,
- Nitiranje u solnim kupkama,
- Nitiranje u plazmi.

Na slici 7. prikazani su komercijalni nazivi industrijski najzastupljenijih postupaka nitiranja i nitrokarburiranja, a u tablici 1. su navedeni značajniji nedostaci i ograničenja u primjeni ovih postupaka.



Slika 7. Pregled postupaka nitrokarburiranja [8]

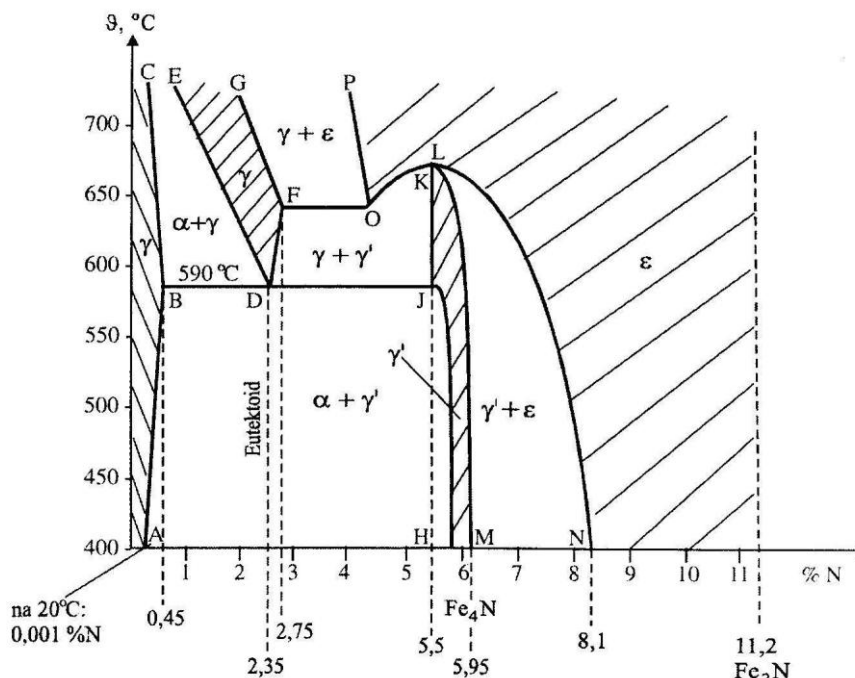
Tablica 1. Nedostaci postupaka nitriranja [9]

Postupak	Nedostaci
Nitriranje u solnim kupkama	<ul style="list-style-type: none"> • Procesi ograničeni samo na one čelike, koji mogu biti zagrijani na visoke temperatura, bez gubitka osnovne tvrdoće • Samo kratki procesi • Potrebno temeljito pranje predmeta nakon procesa, zbog uklanjanja ostataka soli, koji mogu prouzročiti koroziju • Opasnost za zdravlje • Problem odlaganja otpada
Plinsko nitriranje	<ul style="list-style-type: none"> • Dobiva se tanki, krhak bijeli sloj koji se mora ukloniti • Nehrđajući čelici zahtijevaju posebnu aktivacijsku tehniku
Ionitriranje	<ul style="list-style-type: none"> • Opasnost od pregrijavanja, bez stalnog promatranja • Rezultati procesa osjetljivi na geometriju i aranžman peći • Potreba za visokokvalificiranom i iskusnom radnom snagom

Od navedenih postupaka detaljnije će se opisati postupci nitrokarburiranja i naknadne oksidacije s kojim će se provoditi pokusi u radu.

4.1.2 Nastanak i svojstva nitriranog sloja

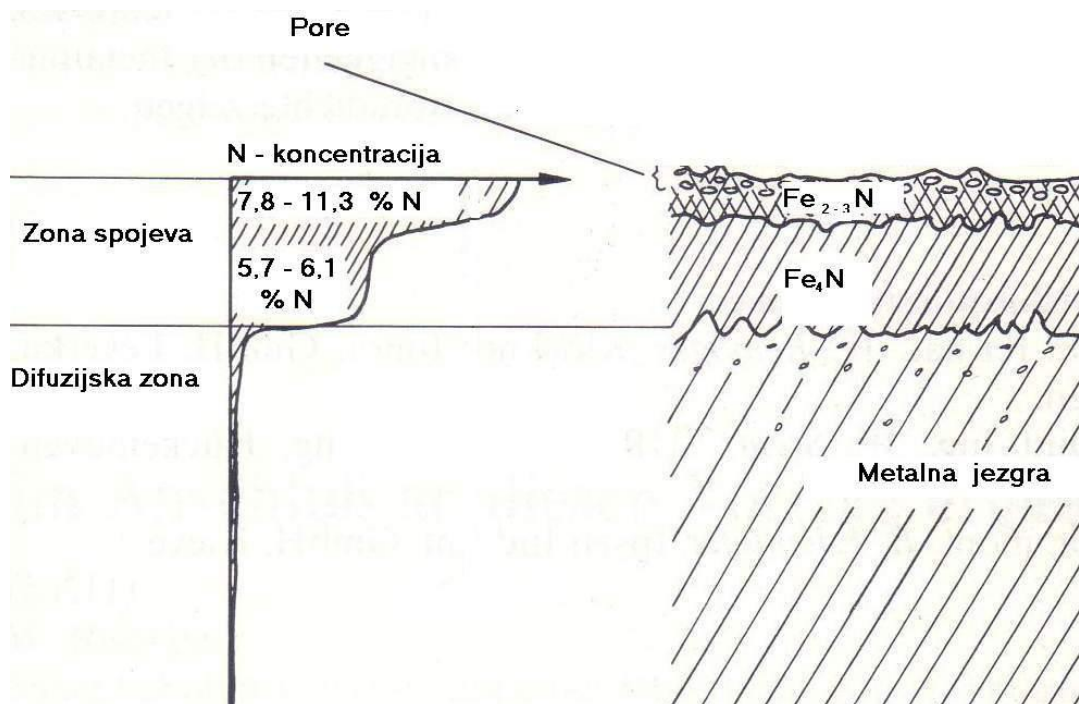
Postupci nitriranja i nitrokarburiranja provode se ispod temperature nastanka austenita (temperatura A_1 u dijagramu Fe-C). Uobičajene su temperature nitriranja ispod 590 °C. Prema tome, u Fe-legurama neće biti pretvorbi (prekristalizacije) što omogućava toplinsku obradu bez značajnije deformacije volumena. Iznad temperature 590 °C stvaraju se krhki i neuporabljivi nitridi (Fe-N), što se vidi iz dijagrama stanja Fe-N na slici 8.



Slika 8. Dijagram stanja sustava Fe-N [10]

Nakon nitriranja dobiveni sloj sastoji se idući od površine prema jezgri, od zone spojeva (debljine 15 do 20 μm) i difuzijske zone, koje su vidljive na slici 9.

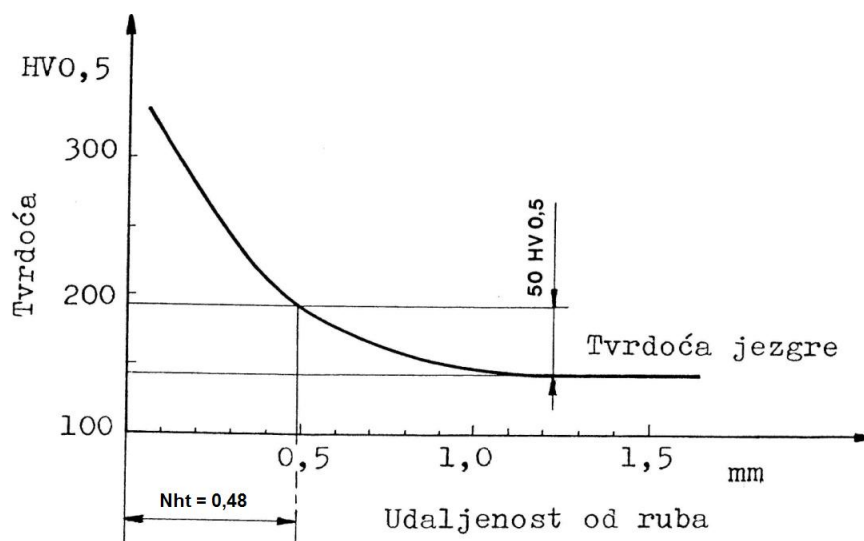
Do stvaranja zone spojeva dolazi zbog male topivosti ugljika u feritu, tako da u samom početku procesa nitrokarburiranja u slanoj kupki dolazi na površini do stvaranja sloja koji se sastoji samo od spojeva željeza i eventualno legirajućih elemenata, sa N i C, te se stvaraju nitridi i karbidi. Posljedica stvaranja nitrida sa željezom (Fe₂N, Fe₄N) sa legirajućim elementima (AlN, CrN, ...), je povećana otpornost na trošenje [11]. U zoni spojeva su zbog visokog sadržaja dušika prisutni karbonitridi i/ili nitridi (γ' – Fe₄N, ε – Fe₂₋₃N, Fe_x(C,N)) u tolikoj mjeri, da se struktura tog sloja bitno razlikuje od ostalog područja: kemijskim sastavom, svojstvima, izgledom. Zona spojeva sastoji se od γ' i ε faze. Stehiometrijski Fe₄N sadrži 5,88 % N. γ' - nitridi imaju koncentraciju dušika između 5,7 i 6,1 %, nalaze se u obliku FCC kristalne rešetke i iznad 650 °C disociraju [6,11]. Željezni nitridi tipa ε nalazi se u obliku HCP kristalne rešetke i sadrži 7,8 do 11,3 % N. Pretežno se pojavljuju kod nitriranja u solnim kupkama. ε – faza je žilava, te je stoga poželjna posebno za zaštitu od adhezijskog trošenja. Razlog većoj duktilnosti ε – faze je u činjenici što se ona redovito sastoji od karbonitrida, a ne samo od nitrida, a karbonitridi su žilaviji od nitrida [6,11]. Zbog HCP kristalne rešetke postiže se inkompatibilnost prema ostalim oblicima metalnih rešetaka, što prvenstveno povećava otpornost na **ADHEZIJSKO TROŠENJE**.



Slika 9. Shematski prikaz raspodjele faza, te zone spojeva i difuzijske zone kod nitriranog i nitrokarburiranog čelika [12]

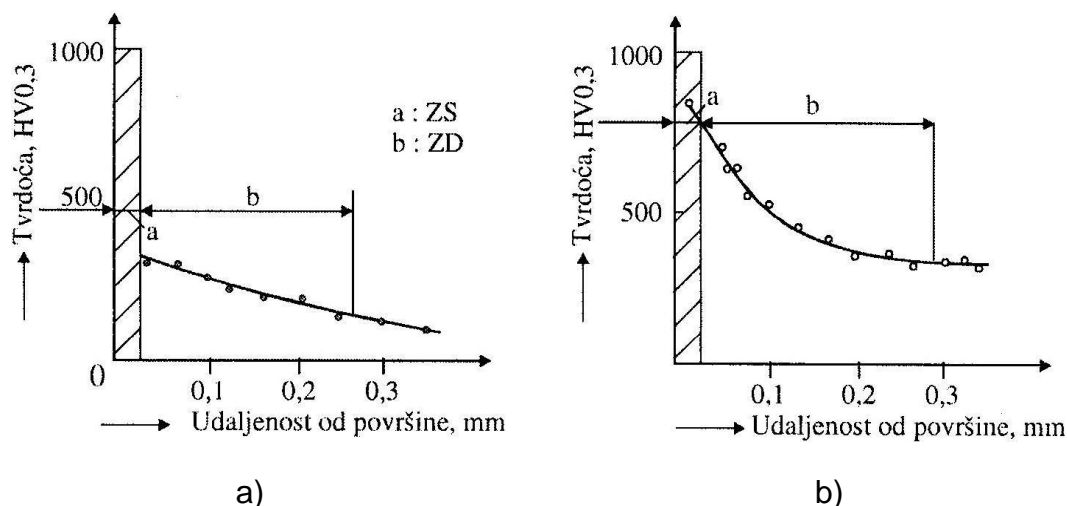
Difuzijska zona nastavlja se na zonu spojeva i sadrži osim elemenata N,C,O u čvrstom ili djelomično precipitiranom stanju, dovedene u materijal tijekom nitrokarburiranja i nitride. Sporim hlađenjem s temperature nitrokarburiranja ili naknadnim ugrijavanjem čelika (namjerno ili u postupku post-oksidacije) moguće je difuzijsku zonu uočiti zbog izlučivanja igličastih nitrida i karbonitrida. Zona spojeva je kod nitrokarburiranja, bez obzira na svoju malu debljinu, vrlo bitna za visoku otpornost na trošenje i služi kao klizni sloj. Zato se kod nitrokarburiranja, zahtjeva ispravna i dovoljno debela zona spojeva

Na slici 10. vidi se uobičajeni raspored tvrdoće nakon provedenog procesa nitriranja ili nitrokarburiranja čelika. Na istoj slici prikazano je i određivanje efektivne dubine nitriranja (Nht).



Slika 10. Raspored tvrdoće na nitriranom uzorku od čelika Č1220 (C15): Nitrirano u solnoj kupki Tenifer pri temperaturi 580 °C tijekom 2 sata, ohlađeno u vodi [6]

Efektivnu dubinu nitiranja (N_{ht}) čine zona spojeva i dio difuzijske zona s povišenjem tvrdoće u odnosu na jezgru obratka. Vrijednost N_{ht} utvrđuje se mjerenjem dva niza tvrdoća na poprečnom presjeku istog uzorka. Mjeri se metodom Vickers ili Knoop uobičajeno s opterećenjem 4,9 N (HV0,5). Efektivna dubina nitiranja je ona okomita udaljenost od ruba do mjesta gdje je granična tvrdoća (HG) jednaka tvrdoći jezgre + 50 HV. Međutim, treba razlikovati ukupnu dubinu nitrokarburiranja (ukupna dubina do koje je dušik difundirao u čelik), od efektivne dubine nitrokarburiranja N_{ht} . Efektivna dubina nitiranja određena na ovaj način, manja je od ukupne dubine nitiranja [6]. Na slici 11. vidljivo je, da je dubina difuzijske zone nakon provedenog procesa nitrokarburiranja veća kod nelegiranih nego kod legiranih čelika. To se događa zbog toga što legirajući elementi stvaranjem nitrida potroše dušik već u tankom površinskom sloju, dok on još nije difuzijom dospio u dublje slojeve.



Slika 11. Tok krivulje tvrdoće u zoni difuzije nakon nitrokarburiranja [11] čelika: a) C15, b) 34Cr4

Nitrirati se može svaki čelik, bez obzira na to koliki mu je udio C i legiranih elemenata. Isto tako mogu se nitrirati i željezni ljevovi, ali do velikog povišenja tvrdoće na površini doći će samo ako u čeliku ima već legirajućih elemenata nitridotvoraca (V, Ni, osobito Al)

Nakon završenog procesa nitiranja nema klasičnog kaljenja, niti potrebe za brzim hlađenjem kao kod pougljičavanja. Međutim, u većini slučajeva, kad su predmeti izvrnuti većim površinskim tlakovima i kad se od čelika zahtijevaju i dobra mehanička svojstva jezgre, predmeti se prije samog nitiranja poboljšavaju, tj. provodi se kaljenje i visokotemperaturno popuštanje, na temperaturu višu od temperature nitiranja.

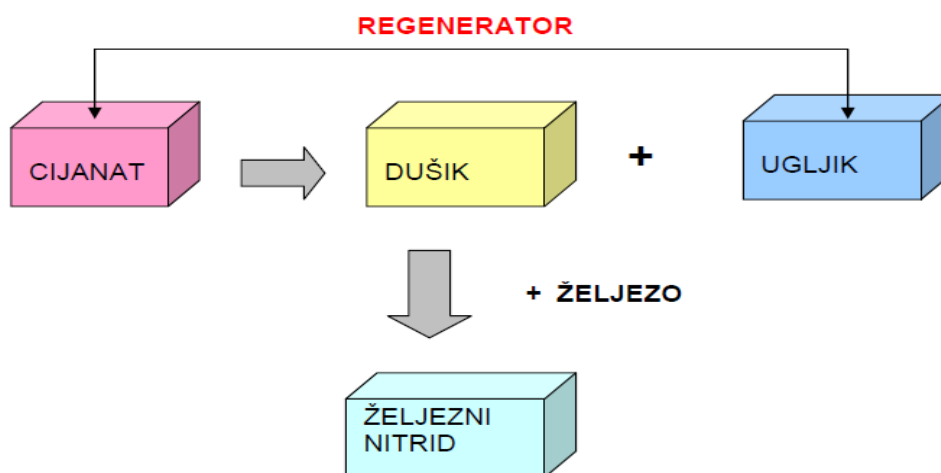
4.1.3 Nitrokarburiranje postupcima Tenifer i Tenifer-QPQ

Jedan od jednostavnijih postupaka modificiranja površine i postupaka nitrokarburiranja je nitrokarburiranje u solnoj kupci, postupkom TENIFER. Nakon završetka ovog procesa, dijelovi mogu ići u eksploataciju ili se može primijeniti postupak poliranja i postupak naknadne oksidacije.

Ovaj postupak zove se TENIFER QPQ i njime se, dodatno povećava otpornost na trošenje i koroziju. Uobičajeni nazivi za postupke Tenifer-/QPQ su i Tufftride-/QPQ, dok su u SAD-u ovi postupci poznati pod nazivom Melonite-/QPQ. Tufftride, proces nitrokarburiranja u solnoj kupci, koristi se u mnogim industrijama već desetljećima. Koristi se poboljšavanje raznih svojstava kao što su otpornost na trošenje, dinamička čvrstoća, korozijska postojanost, predmeta podvrgnutih procesu.

Postupak nitrokarburiranja u solnoj kupci, zamjenjuje u praksi druge postupke modificiranja površine kao što su npr. cementiranje ili tvrdo kromiranje pa se tako za ista ili bolja svojstva površine, postiže bolja ekonomičnost. Postupak TENIFER QPQ se najčešće koristi za obradu strojnih dijelova kao što su: dijelovi hidrauličkih komponenti (klipovi, klipnjače), koljenasta vratila i sl., te dijelove alata za topli rad, tlačni lijev aluminijskih legura, alata za prešanje polimera i sl.

Postupak nitrokarburiranja u solnoj kupki je jednostavan za provedbu zato jer je potrebno nadzirati samo tri parametra: temperaturu, vrijeme obrade i sastav solne kupke. Solna kupka TF1 u kojoj se provodi nitrokarburiranje sadrži alkalijeve cijanate ($\text{Na}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$) i karbonate ($\text{NaOCN} / \text{KOCN}$) [13]. Udio cijanata u solnoj kupki treba biti oko 38 % CNO. Tijekom postupka nitrokarburiranja dolazi do reakcije između površine obratka i alkalijevih cijanata što dovodi do stvaranja alkalijevog karbonata i u manjoj količini cijanida u iznosu od 0,5 – 4 % C,N kao što je prikazano na slici 12. Dodavanjem sintetičkog regeneratora REG1 koji sadrži ugljik, dušik i vodik ponovno se uspostavlja optimalna aktivnost kupke TF1 tvoreći aktivne nitridne konstituente [13]. Što se više smanjuje udio ugljika time se povećava udio cijanida u kupki. Sama po sebi kupka TF1 nije otrovna, isto tako i regeneratore REG1 i sol TF1 ne sadrže otrovne konstituente, te zbog toga nisu potrebne sigurnosne mjere prilikom skladištenja.

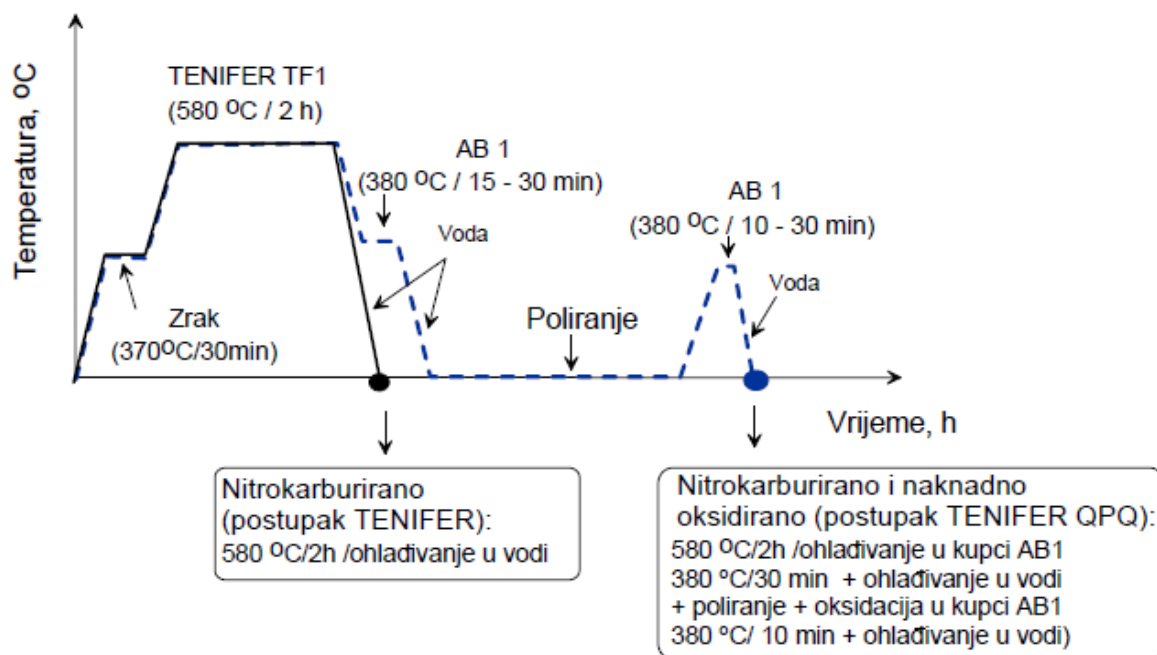


Slika 12. Prikaz osnovnih kemijskih reakcija u solnoj kupki TF1 [8]

Nitrokarburiranjem dobit će se zone spojeva $\text{Fe}_{2...3}(\text{N,C})$, tj. razmjerno žilave karbonitride otporne prvenstveno na adhezijsko trošenje. Debljina zone spojeva ovisi o trajanju nitrokarburiranja. Uz uobičajena trajanja 3-4 sata kod nelegiranih čelika zona spojeva iznosi prosječno 20 μm , a kod legiranih čelika 8-12 μm [7]. Difuzijska zona je deblja od zone spojeva, a nastala je samo difuzijom dušika i njegovim smještanjem u intersticijske prostore ferita ili visokopopuštenog martenzita. Tvrdoće zone spojeva dobivenih postupkom Tenifer-/QPQ iznose 800 – 1500 HV [11].

Postupak nitrokarburiranja se sastoji od nekoliko faza, koje su vidljive na slici 13. Prva faza je predgrijavanje na zraku pri temperaturi 350 – 400°C u vremenu trajanja od 30 minuta. Druga faza je nitrokarburiranje u solnoj kupki TF1 pri temperaturi 480 – 630 °C (uobičajena temperatura je 580°C) u vremenu trajanja od dva sata. a zatim ohlađivanje obratka u oksidativnoj kupki AB1 pri temperaturi 370 – 420°C [12]. Osim hlađenja obratka nakon što su provedene prve dvije faze postupka, kupka AB1 ima i niz drugih prednosti kao što su [13]:

- oksidacijsko djelovanje nakon kojeg nastaje crni željezni oksidni sloj (magnetit),
- pozitivan utjecaj na dimenzijsku stabilnost ohlađenih obratka (mala mogućnost da dođe do pucanja).

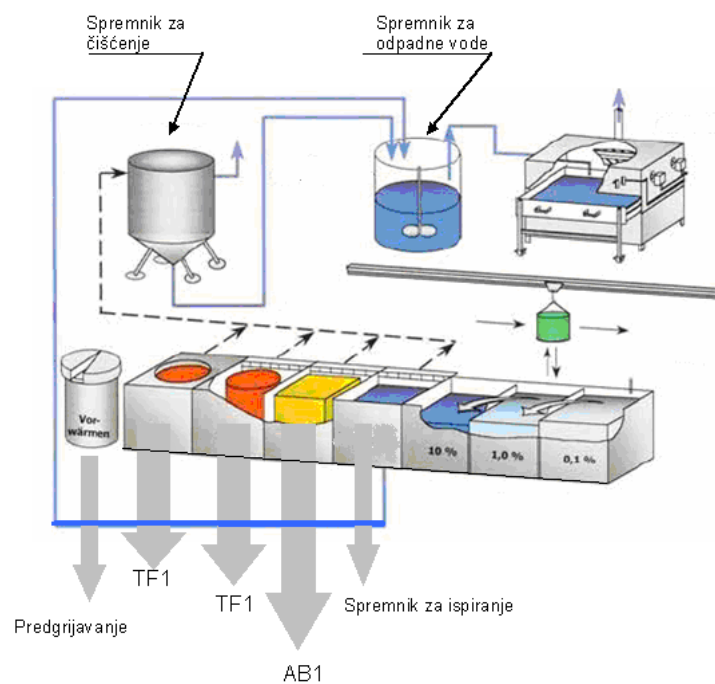


Slika 13. Dijagram postupka nitrokarburiranja sa i bez naknadne oksidacije [10]

Vrijeme trajanja hlađenja ovisi o dimenzijama obratka te uglavnom iznosi 15 – 30 minuta (kako bi se izjednačila temperatura površine i jezgre). Nakon što se obradak ohladi u vodi ili na zraku na sobnu temperaturu, ispiru se u toploj vodi kako bi se uklonili eventualni ostaci soli. Postupak koji se provodi samo do ovog stadija naziva se **Tenifer Q proces**, a nastali sloj se sastoji od zone spojeva, difuzijske zone i od oksidnog sloja Fe_3O_4 . U trećoj fazi slijedi poliranje obratka koje se izvodi upotrebom brusnog papira kojim se skida 2 – 3 μm površinskog poroznog sloja, pri tome treba paziti da se ne odstrani previše kako se ne bi narušila postojanost zone spojeva. Tako pripremljen obradak ima manju hrapavost površine i niži koeficijent trenja. Ovaj stadij se zove Tenifer QP proces. Nakon poliranja slijedi četvrta faza. U ovoj fazi obradak se ponovno uranja u oksidativno kupku AB1 na temperaturi 380 °C u vremenu trajanju od 10 – 30 minuta s ciljem povišenja korozijske postojanosti. Na kraju postupka obratci imaju lijepu tamno plavu boju. Ovaj postupak se zove Tenifer QPQ proces. Na sljedećoj slici, slika 14. Prikazan je shematski prikaz postrojenja postupak Tenifer-/QPQ Na slici 15. vidi se primjer jednog automatiziranog postrojenja za postupak Tenifer-/QPQ

Postupkom nitrokarburiranja Tenifer-QPQ u odnosu na samo nitrokarburiranje bez oksidacije postižu se sljedeće dodatne prednosti [10]:

- poboljšana otpornost na trošenje adhezijom,
- smanjena sklonost "zaribavanju",
- povišena dinamička izdržljivost,
- povišena postojanost na koroziju,
- Povišena otpornost prema gubitku tvrdoće na višim temperaturama.



Slika 14. Shematski prikaz postrojenja za nitrokarburiranje Tenifer-/QPQ [8]



Slika 15. Automatizirano postrojenje za nitrokarburiranje Tenifer-/QPQ [13]

Zbog navedenih prednosti postupak Tenifer – QPQ koristi kod povišenje otpornosti na trošenje i koroziju alata poput alata za hladni i topli rad (kalupi, ekstruderi, žigovi) i strojnih dijelova kao što su [13]: hidraulički i pneumatski sistemi (cilindri, klipnjače, klipovi), zupčanici, radilice, koljenasta vratila i sl. (slika 16)



Slika 16. a) Koljenasto vratilo nakon procesa Tenifer-/QPQ [13]
b) Dijelovi za motor automobila (ventili, vođice ventila ...) nakon nitrokarburiranja Tenifer-/QPQ [13]

4.2 Boriranje

4.2.1 Osnovni postupci boriranja i primjena

Boriranje pripada u toplinsko-kemijske postupke modificiranja površine, kojim se omogućuje da u površinu čeličnog predmeta difundira kemijski element bor (B). Temperature obrade kod modificiranja površine postupkom boriranja iznose od 800 – 1000 °C, a trajanje postupka iznosi nekoliko sati, i ovisno o parametrima postupka boriranja dobiveni sloj sastoji se od jednofaznog ili dvofaznog sloja borida.

Postupak boriranja može se provesti u različitim sredstvima koja sadrže bor, a koja mogu biti u tri agregatna stanja [10]:

- plinovitom,
- tekućem,
- čvrstom.

U tablici 2. navedena su uobičajena sredstva i industrijski primjenjivi postupci boriranja.

Tablica 2. Sredstva za boriranje i karakteristike postupaka [11]

	SASTAV MEDIJA ZA BORIRANJE	POSTUPAK BORIRANJA
BORIRANJE U PLINSKOJ ATMOSFERI	BF ₃ , BCl ₃ , BBr ₃ čist ili vodik	Plinovito sredstvo za boriranje na temperaturi obrade struji preko predmeta ugrijanog indukcijski ili u cijevnoj peći.
	B ₂ H ₆ + vodik	
	(CH ₃) ₃ B/(C ₂ H ₅)B	
BORIRANJE U KUPCI	Na ₂ B ₄ O ₇ (+NaCl/B ₂ O ₃)	Elektroliza! Predmet je katoda, grafit ili platina su anoda.
	HBO ₂ + NaF	Elektroliza! Predmet je katoda, a sredstvo za boriranje anoda. Kupka je fluoridna.
	Bor ili čvrsti borovi spojevi u fluoridnim taljevinama	
	B ₄ C(+ NaCl/+BaCl ₂ +NaBF ₄)	Uranja se u rastaljenju u sol, bez elektrolize.
	Vodena otopina Na ₂ B ₄ O ₇	Indukcijsko ugrijavanje u vodenoj otopini.
BORIRANJE U PRAŠKU ILI PASTI	B ₄ C+Na ₃ AlF ₆ + etilsilikat	Indukcijsko ugrijavanje nakon nanošenja paste.
	Ferobor+Na ₃ AlF ₆ + vodeno staklo	
	Amorfni bor (+aktivator)	Ugrijavanje u komornoj peći.
	Ferobor (+ aktivator)	Pakovanje u prašak ili (parcijalno) premazivanje pastom.
	B ₄ C + aktivator	

Najpovoljnije sredstvo za provođenje postupka boriranja je čvrsto sredstvo, To je između ostalog, zbog mogućnosti brojnih varijacija, što omogućava da se sposobnost boriranja podesi točno po potrebi. Danas se sredstva za boriranje mogu podesiti tako da se dobi samo jednofazni sloj, ali to ovisi o %C, drugim legirnim elementima u čeliku i parametrima termokemijske obrade boriranja. Međutim, glavna prednost boriranja u čvrstom sredstvu, koje se provodi u komornoj peći, su relativno niski troškovi uređaja i sredstava u odnosu na ostale načine boriranja. I osim toga, postupak se može provesti u svakoj kalionici koja ima komornu peć za cementiranje s mogućnosti ugrijavanja na barem 1000 °C. Međutim, između danas poznatih postupaka, najekonomičniji je postupak boriranja u aktivnoj smjesi na bazi borova karbida koji u trgovini se nalazi pod komercijalnim nazivom EKABOR [10]. U sljedećoj tablici 3. navedene su razlike između više vrsta EKABOR sredstva, ovisno o veličini zrna i svojstvima.

Tablica 3. Veličina zrna i svojstva EKABOR sredstva za boriranje u prašku [14]

NAZIV SREDSTVA ZA BORIRANJE	VELIČINA ZRNA	SVOJSTVA BORIRANE POVRŠINE
EKABOR 1	< 150 μm	Površina je visoke kvalitete, sidrenje je odlično
EKABOR 2	< 850 μm	Površina je vrlo dobre kvalitete, obradak se lako vadi nakon T.O.
EKABOR 3	< 1400 μm	Površina je dobre kvalitete, obradak se lako vadi nakon T.O.
EKABOR HM	< 150 μm	Površina vrlo dobre kvalitete, a sloj borida je tanji, za tvrde metale
EKABOR Ni	< 150 μm	Za boriranje Ni-legura

Boriranje se prvenstveno primjenjuje u uvjetima kada se želi povećati otpornost prema trošenju, i to abrazijskom, adhezijskom i erozijskom trošenju. Isto tako, za određene eksploatacijske uvjete moguće je, definiranjem parametara postupka i načina boriranja dobiti tražena svojstva.. Boriranjem srednje legiranih čelika moguće je zamijeniti visokolegirani čelik.

Neki od primjera korištenja postupka boriranja su [6, 15, 14]:

- dijelovi ventila,
- dijelovi mjenjača,
- valjci za graviranje,
- dijelovi turbina,
- kalupi za prešanje,
- medicinski instrumenti,
- trnovi i žigovi za duboko vučenje,
- sapnice za lijevanje,
- kuglasti ventili,
- naftovodi,
- plinovodi.

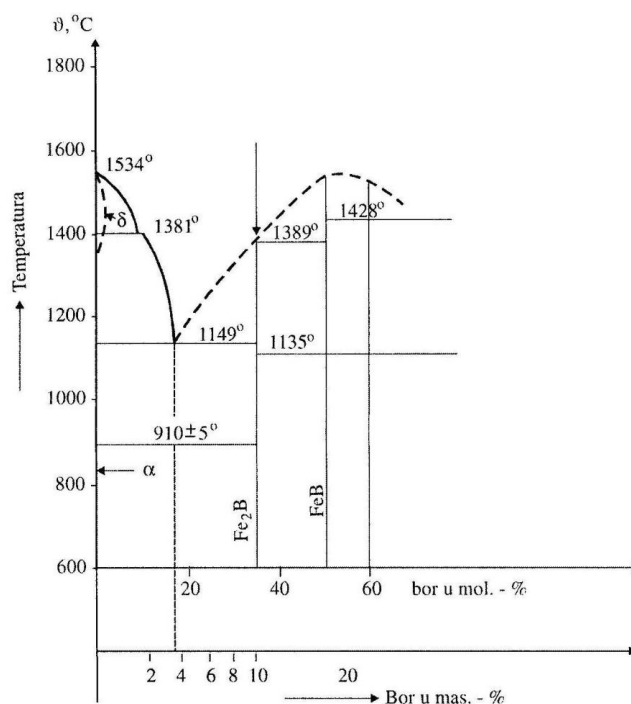


Slika 17. a) Primjer primjene procesa boriranja [14]
b). Dijelovi u industriji stakla nakon procesa boriranja [14]

4.2.2 Nastanak i svojstva boridnog sloja

Na sljedećoj slici prikazan je sustav Fe-B [10]. U dijagramu uočavamo stanje dva željezna borida s sljedećim sastavom [10]:

- Fe_2B sa 8,83 %B
- FeB sa 16,23 %B
- i eutektik sa 3,8 %B i s talištem na 1149 °C



Slika 18. Binarni sustav Fe-B po Hansenu [10]

Tijekom postupka boriranja čelika elementarni bor (B) difuzijom ulazi u površinski sloj obratka i stvara kompleksne spojeve boride tipa Fe_2B (poželjni spoj) i/ili FeB (nepoželjni spoj) [11]. Svojstva ovih borida vidljiva su iz tablice 4.

Tablica 4. Osnovne karakteristike Fe-borida [6]

Tip boridnog sloja	Postotak mase B u spoju	Vrsta kristalne rešetke	Linearni koeficijent toplinskog rastezanja, 10^{-6} m/mK	Tvrdoća HV 0,1	Tip napetosti u sloju
FeB	16,2	rombska	23	1900 - 2100	vlačne
Fe_2B	8,83	FCC	7,85	1800 - 2000	tlačne

Dobiveni slojevi imaju sljedeća svojstva [11, 15]:

- izvanredno visoka tvrdoća:
 - Fe_2B od 1400 – 1600 HV 0,1;
 - FeB od 1800 – 2100 HV 0,1 ali je znatno krhkiji, pa je zbog toga nepoželjan u praktičnoj obradi;
- postojanost pri povišenim temperaturama (do 1050°C);
- povišena otpornost na trošenje, osobito abraziju;
- niži koeficijent trenja (0,4);

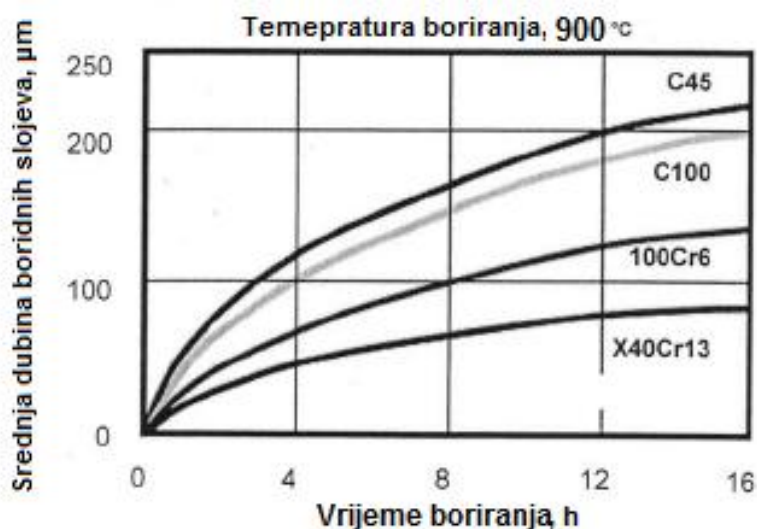
- niska sklonost hladnom zavarivanju;
- povišena otpornost na kiseline i lužine;
- može se provesti postupak poliranja nakon procesa boriranja;
- debljina zone spojeva je od 20 – 500 μm , a dubina prodora bora (difuzijska zona) i do 1mm ovisno o uvjetima boriranja.

S obzirom da je veza između boridnih slojeva i osnovnog materijala solidna, tj. prodor borida je “zubat” kod ugljičnih čelika, možemo reći da su oni najprikladniji za provođenje ovog procesa, ali mogu se borirati i ostali čelici, kao što su [10]:

- niskolegirani,
- negirani,
- Armco željezo,
- željezni ljevovi,
- tvrdi metali.

Međutim, svi su oni sa slabijim učinkom u usporedbi s ugljičnim čelicima. Razlog tomu je taj, jer je kod njih veza između dobivenog boridnog sloja i osnovnog materijala glađa, tj. boridni sloj nema izrazit “zubati” prodor i čvrsto sidrenje. Dubina boriranog sloja, slika 19. ovisi o:

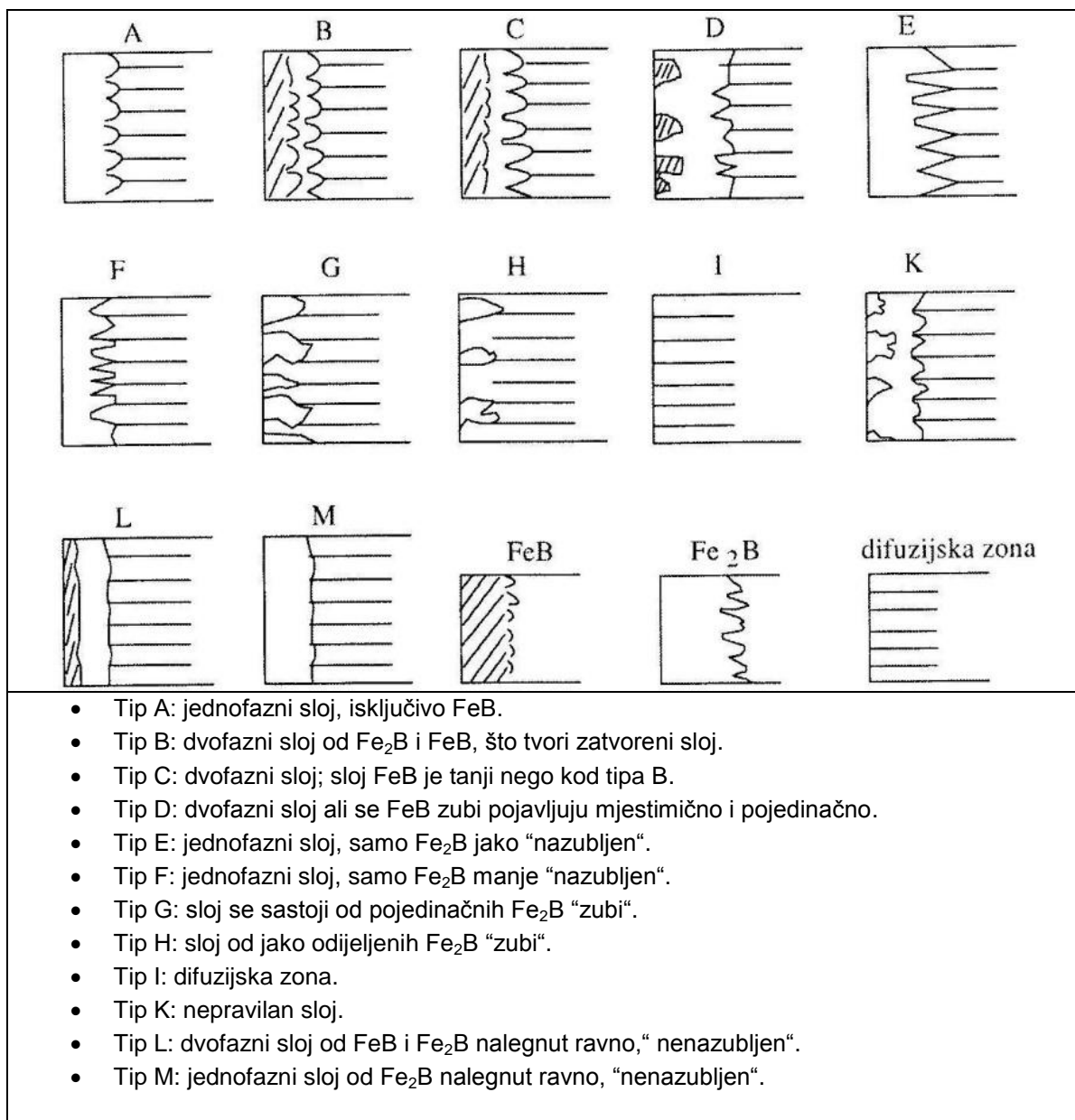
- temperaturi boriranja,
- trajanju boriranja,
- sastavu materijala koji se borira.



Slika 19. Srednja dubina boridnih slojeva ovisna o vremenu boriranja u prašku Durborid 2 [10]

Dobiveni boridni sloj može se formirati od jedne ili dvije vrste borida. Ako se radi o sredstvima koja pokazuju visoku “sposobnost boriranja”, nastat će dvofazni sloj, što nije poželjno. Vanjska faza sastoji se tada od borida FeB (bogat borom), a unutarnja od Fe_2B borida (borom siromašnog). Pa zbog toga, u ovisnosti o sastavu sredstva za boriranje i režimu boriranja (temperatura i trajanje procesa), mogu nastati različiti tipovi borida vidljivih na slici 20.

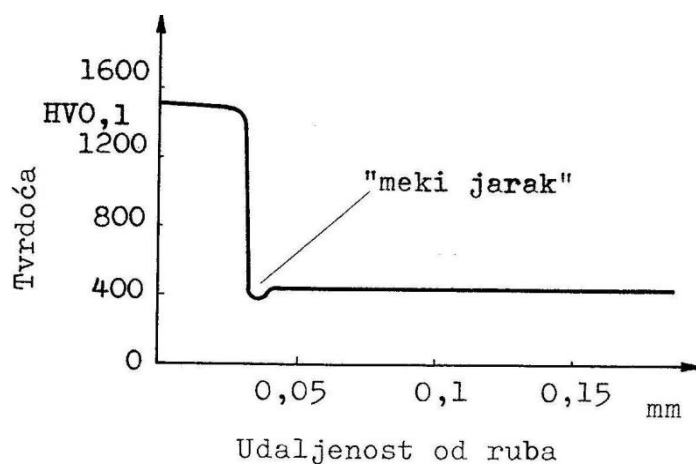
Najpovoljniji tipovi boridnih slojeva su monofazni sloj Fe_2B , a prema slici to su tipovi E i F, a dopušta se još i tip D [11]. Nije poželjno uobičajeno područje temperatura obrade od 800 – 1000 °C proširivati prema gore (više temperature obrade), jer bi inače došlo do lokalnog pregrijavanja i do stvaranja eutektika. Međutim, iznimno se kod debelih boridnih slojeva (oko 400 μm – za abrazijsko trošenje) dopušta temperatura obrade od 1050°C.



Slika 20. Tipovi boridnih slojeva (prema Kunstu i Schaaberu) [10]

Nakon provedenog procesa boriranja ispod zone dobivenih boridnih slojeva nalazi se difuzijska zona. U toj zoni kemijski element bor je otopljen u feritu koji je zbog toga očvrsnuo. Također dolazi i do povišenja udjela perlita neposredno ispod zone spojeva te dolazi do pojave tzv. ugljikovog bedema. Ugljikovim bedemom nazivamo područje koje se nalazi ispod zubi boridnog sloja, a koje ima povećanu koncentraciju ugljika u odnosu na osnovni materijal. Ugljikov bedem nastaje zbog toga, jer prilikom difuzije kemijskog elementa bora, bor potiskuje ugljik sa površine prema jezgri obradka. Ova pojava povoljna je ako je borirani obradak predviđen za toplinsku obradu kaljenjem jer će veća koncentracija ugljika rezultirati i višom tvrdoćom. Međutim, negativna strana stvaranja ugljikova bedema je povećana krhkost. Izražena krhkost posebno se pojavljuje kod nadeutektoidnih čelika.

Vrlo važno je napomenuti negativan utjecaj Si i Al u čeliku na rezultate boriranja. Kod čelika koji sadrži povećani udio Si i Al, ispod dobivenog boridnog sloja dolazi do stvaranja tzv. "mekog jarka" (slika 21.), a on vrlo loše utječe na svojstva obratka u eksploataciji jer se stvara tvrdi rub na mekoj podlozi. To je uvjetovano forsiranjem stvaranja ferita od strane Si i Al [6].



Slika 21. Raspored tvrdoće na boriranom uzorku od čelika Č4751 [6]

U eksperimentalnom dijelu rada planira se provesti boriranje u prašku Durborid 2 na ispitnim uzorcima od čelika C45.

4.3 Vanadiranje

4.3.1 Opis i primjena postupka vanadiranja

Vanadiranje je toplinski – kemijski postupak modificiranja površine materijala (difuzijsko stvaranje karbidnih slojeva). Ova skupina postupaka modificiranja površine, kod kojih se istovremeno obavlja proces difuzije metalnih i nemetalnih elemenata, tj. dolazi do difuzijskog stvaranja tvrdih karbidnih slojeva, razvila se kao alternativa postupcima CVD i PVD (postupci prevlačenja u parnoj fazi), jer ne zahtijevaju velika investicijska ulaganja, ne proizvode otrovne i opasne plinove. Zbog ovih činjenica, i spoznaje da se nakon provedenog postupka dobije karbidni sloj visoke tvrdoće od 3200 – 3800 HV, difuzijsko formiranje karbidnih slojeva na površini, danas ima sve veću primjenu u raznim industrijama [16].

Vanadiranje je difuzijski postupak modificiranja površine, nakon kojeg će doći do stvaranja vanadij karbida (VC). Postupak se provodi u solnoj kupki (granulatu) pri temperaturama od $\approx 1000^{\circ}\text{C}$, u trajanju od nekoliko sati [17]. Po završetku procesa difuzije, obradak se sa temperature obrade podvrgava hlađenju u vodi, ulju ili slanoj kupki. Solna kupka koja se koristi, uz borax sadrži i vanadij te odgovarajuće aktivatore. Postupak se provodi u loncima koji su napravljeni od vatrootpornog čelika, bez primjene zaštitne atmosfere. U kupki se odvija proces koji za konačan učinak ima stvaranje vanadij karbida na površini obratka. Proces stvaranja karbidnog sloja, te njegova konačna debljina ovise o temperaturi, trajanju procesa i o količini ugljika otopljenog u austenitu i legirajućim elementima u obrađivanom čeliku [18].

Zbog dobrih triboloških i kemijskih svojstva karbidnih slojeva, prvenstveno povećane tvrdoće i otpornosti na trošenje (abrazija, adhezija, tribokorozija), te zbog višestruko povećanog vijeka trajanja predmeta podvrgnut procesu, vanadiranje se primjenjuje kod različitih vrsta alata, kao što su [19]:

- Od konstrukcijskih elemenata primjena je djelotvorna posebno u slučajevima trošenja abrazivnim česticama i u kemijskim agresivnim medijima, kao npr. dijelovi pumpi, rotor pumpi (slika 26),
- Alati za obradu metala odvajanjem čestica,
- Alati za tlačno lijevanja aluminijskih legura, radi sprečavanja naljepljivanja i erozije u uljevnom sustavu,
- Dijelovi alata za obradu polimernih materijala sa abrazivnim punilima,
- Alati za oblikovanje deformacijom.



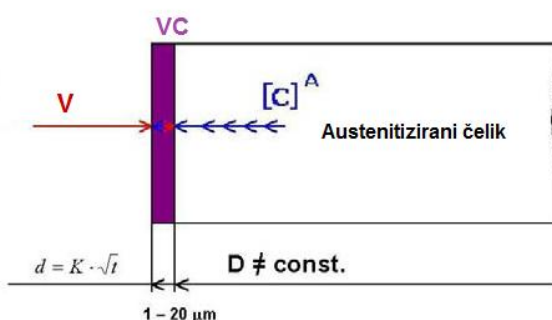
Slika 22. Primjer primjene postupka vanadiranja (TD) [20]



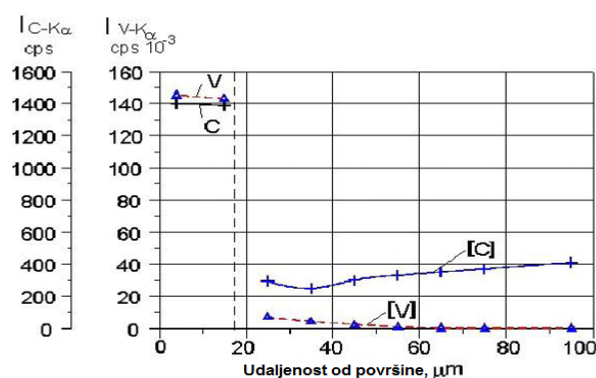
Slika 23. Primjer primjene postupka vanadiranja (TD) [20]

4.3.2 Nastanak i svojstva vanadiranog sloja

Proces vanadiranja se provodi pri visokim temperaturama oko 1000 °C uz prisustvo jakih karbidotvoraca (V, Cr, Nb, W, Ti), koji reagiraju s ugljikom iz čelika. Nakon vanadiranja na površini čelika stvaraju se karbidi tipa: VC, Cr₇C₃, V₈C₇, NbC, WC ili TiC. Potreban ugljik za stvaranje karbida difuzijom se iz unutrašnjih slojeva čelika izvlači na površinu kako je prikazano na slici 24. Stoga ispod karbidnog sloja nastaje difuzijska zona osiromašena ugljikom, što ima za posljedicu pad tvrdoće [21]. Na slici 25. prikazan je raspored mase ugljika i vanadija, nakon provedenog procesa vanadiranja.



Slika 24. Proces difuzijskog stvaranja vanadij karbida [21]



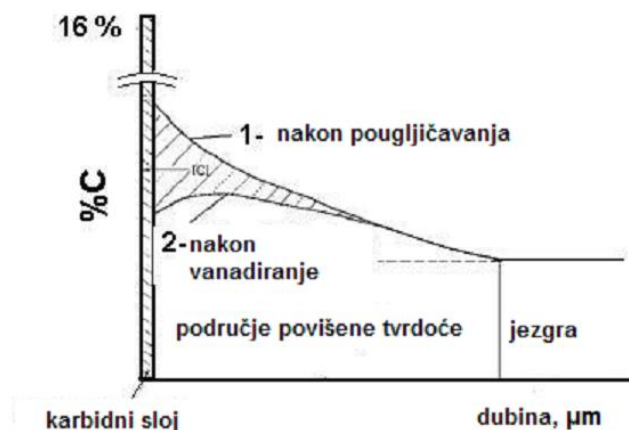
Slika 25. Kvantitativna mikroanaliza presjeka vanadiranog sloja i djelomično razugljičene zone [21]

Karbidi nastali nakon vanadiranja su visoke tvrdoće i otpornosti na trošenje abrazijom, adhezijom i tribokorozijom i niske otpornosti na umor površine. U tablici 5 prikazana su mehanička i fizikalna svojstva karbida nastalih u postupku vanadiranja.

TABLICA 5. Svojstva dobivenog površinskog karbidnog sloja u postupku vanadiranja [7].

Svojstva sloja	TIP KARBIDA					
	VC	WC	TiC	Cr ₇ C ₃	Mo ₂ C	NbC
Tvrdoća , HV	2940	2350	3200	2280	1660	1800
Gustoća , 10 ³ kg/m ³	5,4	15,72	4,94	6,68	9,18	7,78
Temperatura tališta, °C	2648	2776	3160	1895	2517	3613
Koeficijent linearnog širenja, 10 ⁻⁶ K ⁻¹	7,3	3,8–3,9	8,0–8,6	10,3	7,8–9,3	7,2
Modul elastičnosti , kN / mm ²	430	720	470	400	540	580

Nakon provođenja vanadiranja na površini obratka dobiva se zaštitni sloj karbida ispod kojeg je površinski sloj. On nastaje zbog razugličenja rubnog sloja. Ugljik iz čelika troši se na spajanje s karbidotvornim elementima i stvaranje karbida, zbog čega se smanjuje tvrdoća ispod karbidnog sloja. Ovaj nedostatak može se ukloniti duplex postupkom sa prethodnim pougličavanjem površinske zone prije vanadiranja: pougličavanjem se osigurava dostatna količina ugljika za stvaranje karbidnog sloja, posebno kod niskougličnih čelika.



Slika 26. Promjene koncentracije ugljika u duplex postupku [21]

Dobiveni vanadij karbid ima sljedeća svojstva [11]:

- visoka tvrdoća: 3000 – 3800 HV,
- visoka otpornost na trošenje: abrazija, adhezija, tribokorozija.

Međutim, u slučaju visokih pritisaka na površinu dobivenog sloja, sloj neće biti otporan na umor površine [21]. Osnovni problem pri vanadiranju je pojava vanjskog sloja karbida V₂C ispod kojeg se nalazi karbid VC, jer tvrdoća dobivenog karbida V₂C redovito iznosi oko 1800 HV, a karbida VC iznosi više od 3000 HV, pa će se vanjski sloj V₂C redovito odlupljivati, a posebno ako se proizvod nakon provođenja procesa vanadiranja, ponovno kali [17].

EKSPERIMENTALNI DIO

5. Pokusi ispitivanja otpornosti na trošenje

5.1 Plan ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada, planirani su i provedeni pokusi u cilju određivanja mehaničkih i triboloških svojstava tipičnih slojeva proizvedenih odabranim postupcima modificiranja površine. Provedena su sljedeća ispitivanja: ispitivanje hrapavosti, ispitivanje otpornosti na abraziju, na adheziju i određivanje faktora trenja te metalografska ispitivanja. Na osnovi dobivenih rezultata uspoređena su postignuta svojstva slojeva i predložena njihova primjena.

Eksperimentalni dio rada sastojao se od sljedećih faza:

1. **Izbor materijala ispitnih uzoraka**
2. **Izrada uzoraka sljedećih dimenzija:**
 - $\Phi 10 \times 15$, mm
 - $18 \times 10 \times 30$, mm
3. **Toplinska obrada ispitnih uzoraka**
 - Kaljenje i popuštanje,
 - Nitrokarburiranje postupkom TENIFER,
 - Nitrokarburiranje postupkom TENIFER-QPQ (AB1 390 °C),
 - Nitrokarburiranje postupkom TENIFER-QPQ (AB1 420 °C),
 - Boriranje u prašku,
 - Vanadiranje u solnoj kupci.
4. **Ispitivanja i mjerenje:**
 - Ispitivanje otpornosti na trošenje,
 - Ispitivanje hrapavosti,
 - Metalografska ispitivanja.
5. **Obrada i diskusija rezultata**

5.1.1 Izbor materijala i izrada ispitnih uzoraka

Za izradu uzoraka potrebnih za provođenje ispitivanja odabran je nelegirani čelik za poboljšavanje C 45 (Č1531) [7]. U tablici 6. naveden je kemijski sastav odabranog čelika.

Tablica 6. Kemijski sastav odabranog čelika C 45 (Č1531) [7]

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Mo	%Cr	%Ni
0.45	0.64	0.012	0.016	0.22	0,013	0,09	0,066

Ovaj čelik se svrstava u skupinu srednje ugljičnih čelika, pa je iz tog razloga izvrsno pogodan za pokuse planirane toplinske obrade.

Glavni razlozi zbog kojeg je ovaj čelik odabran i zbog kojih je povoljniji od legiranih ili visokougličnih čelika su:

1. Prodor borida i zubatost su također bolji kod niskougličnih čelika pa je veza između sloja borida i osnovnog materijala bolja
2. Nelegirani čelici namijenjeni za boriranje imaju prednost pred legiranim čelicima jer ne dolazi do pojave tzv. mekog jarka koji nepovoljno utječe na radna svojstva, zbog toga jer se u slučaju pojave mekog jarka jako tvrdi rub nalazi na mekanj površini.
3. Kod nitriranja i nitrokarburiranja površina se obogaćuje dušikom koji pri tom difuzijom prodire u materijal, a kako intenzivnost difuzije opada s povećanjem ugljika i legirajućih elemenata, nelegirani niskouglični čelik je zbog toga povoljniji
4. Dubina nitriranog i nitrokarburiranog sloja veća je kod nelegiranih čelika sa manjim udjelom ugljika.

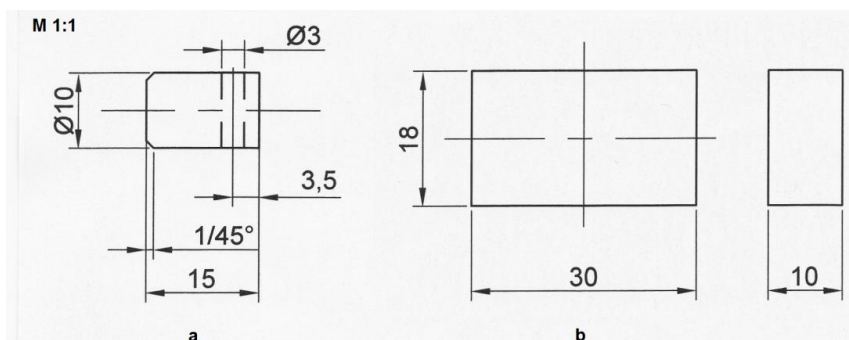
Za proces vanadiranja poželjniji je visokouglični čelik jer vanadij spada u jake karbidotvorce, jer prilikom stvaranja vanadijevih karbida dolazi do osiromašivanja ugljikom sloja ispod površine. Međutim, kako je odabran srednjeuglični čelik i cilj eksperimentalnog dijela nije isključivo proces vanadiranja, prihvaćen je ovaj odabrani čelik i za toplinsku obradu vanadiranja.

Uzorci predviđeni za eksperimentalni dio rada su dimenzija koje su već navedene, a oblici su im različiti ovisno o vrsti ispitivanja (slika 27):

- Za određivanje otpornosti na adheziju: valjčici $\Phi 10 \times 15$, mm
- Za određivanje otpornosti na abraziju: kvadratični uzorci dimenzija $18 \times 10 \times 30$, mm

Dimenzije uzoraka su sljedeće:

- Ispitivanje otpornosti na adheziju i mikrostrukturnu analizu $\Phi 10 \times 15$, mm
- ispitivanje otpornosti na abraziju $18 \times 10 \times 30$, mm



Slika 27. Dimenzije ispitnih uzoraka za planirano ispitivanje

- a) adhezijsko trošenje
b) abrazijsko trošenje

Ispitni uzorci su izrezani iz valjanog profila, te grubo obrađeni na zadane mjere glodanjem ili tokarenjem. Nakon ovih strojnih obrada uzorci su u završnoj obradi brušeni na kvalitetu površine N5. Na uzorcima potrebnim za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje izbušen je provrt radi lakše provedbe nitrokarburiranja i naknadne oksidacije. Nakon strojne obrade slijedilo je označavanje uzoraka prema tablici 7.

Tablica 7. Ispitni uzorci i predviđena ispitivanja

Stanje nakon toplinske obrade	PREDVIĐENA ISPITIVANJA	
	Ispitivanje hrapavosti / adhezijsko trošenje / mikrostrukturna analiza	Trošenje abrazijom
Kaljeno	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "O")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "O")
Nitrokarburirano (Tenifer)	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "17")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "17")
Nitrokarburirano i oksidirano (Tenifer QPQ)	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "E")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "E")
	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "J")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "J")
Borirano	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "31")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "31")
Vanadirano	$\Phi 10 \times 15$ (oznaka uzorka "41")	$18 \times 10 \times 30$ (oznaka uzorka "41")

5.1.2 Toplinska obrada uzoraka

Svi izrađeni ispitni uzorci toplinski su obrađeni su u Laboratoriju za toplinsku obradu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Parametri za pojedinu toplinsku obradu dani su u tablici 8.

Tablica 8. Parametri toplinske obrade

NAZIV TOPLINSKE OBRAD	PARAMETRI OBRAD	OZNAKA UZORKA
Kaljeno i popušteno (HT)	450°C/850 °C/0,5h./voda/ + popuštanje 600 °C/2h/zrak	“O”
(HT) + Nitrokarburirano (Tenifer)	TF1 580 °C/2h/voda	“17”
(HT) + Nitrokarburirano i oksidirano (Tenifer-QPQ)	TF1 580 °C/2h/AB1 390 °C/0,5h/voda + poliranje + AB1 390 °C /0,5h/voda	“E”
	TF1 580 °C/2h/AB1 390 °C/0,5h/voda + poliranje + AB1 420 °C /0,5h/voda	“J”
Borirano + (HT)	EKABOR-1/900 °C/4h/peć + KALJENJE 450 °C/0,5h / 850 °C / 0,5h /voda + popuštanje 600 °C/2h/zrak	“31”
Vanadirano + (HT)	Vanadiranje 900 °C/4h/ulje + KALJENJE 450 °C/30min/ 850 °C/0,5h/voda + popuštanje 600 °C/2h/zrak	“41”

5.2. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata

5.2.1 Ispitivanje hrapavosti površine

Površinska hrapavost je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površinama predmeta koje su višekratno manje od površine cijelog predmeta. Profil površine jest presjek realne površine određenom ravninom.

Ispitivanje je provedeno na prijenosnom uređaju za ispitivanje hrapavosti površina Mitutoyo SJ – 201 na 7 uzoraka po 3 mjerenja.

Ispitivanjem su mjerena 4 parametara:

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje mjernog profila [μm]
- R_z – prosječna visina neravnina [μm]
- R_{\max} – najveća visina vrha profila [μm]
- R_q – korijen srednjeg odstupanja mjernog profila [μm]

Srednje aritmetičko odstupanje mjernog profila (R_a) je aritmetička sredina apsolutne ordinate odstupanja profila hrapavosti od srednje linije unutar ukupne duljine vrjednovanja.

$$R_a = \frac{1}{l \cdot \int |y(x)| dx}$$

(3)

Prosječna visina neravnina (R_z) je srednja visina hrapavosti, tj. srednja vrijednost pojedinačnih visina hrapavosti pet uzastopnih pojedinačnih referentnih duljina mjerenja unutar ukupne duljine mjerenja, tj. duljine ocjenjivanja.

Najveća visina neravnina (R_{\max}) je najveća dubina hrapavosti mjerena na duljini ocjenjivanja, odnosno najveća visina vrha profila, μm .

$$R_{\max} = Z_{\max} \quad (4)$$

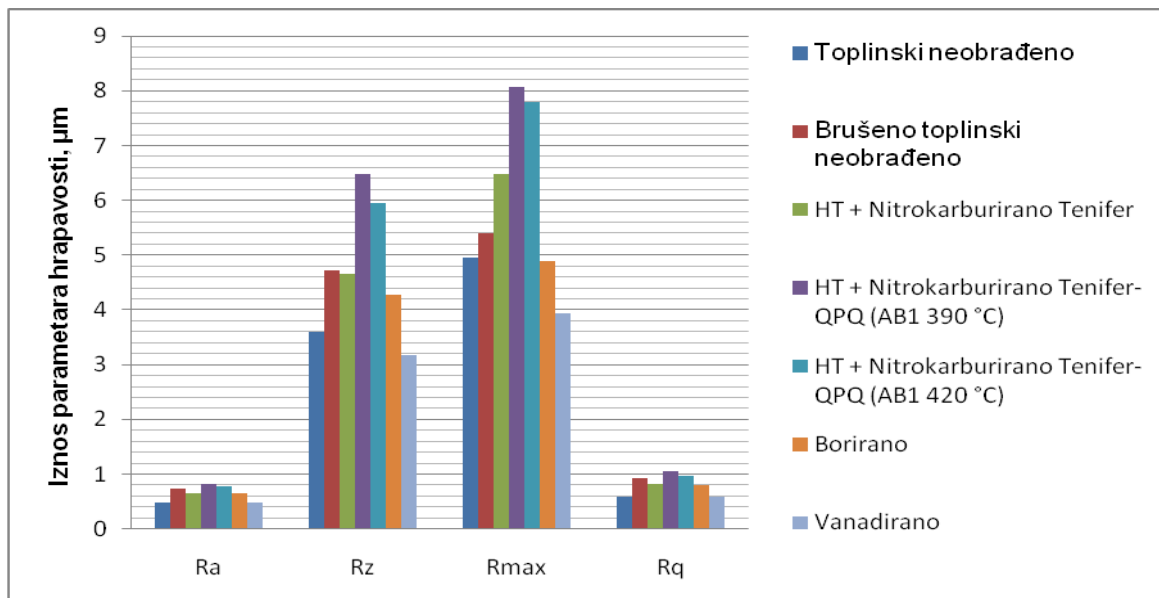
Srednje kvadratno odstupanje profila (R_q) je vrijednost korijena srednje ordinate vrijednosti $Z(x)$ na duljini vrjednovanja.

Mjerenje su provedena standardnim ticalom sa RC filterom valne duljine $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, što je ujedno i referentna duljina.

Duljina ocjenjivanja $L = 4 \text{ mm}$ izračunava se po formuli:

$$LC = RC \times 5 \quad (5)$$

Rezultati ispitivanja hrapavosti površina navedeni su u prilogu 1., a rezultati su prikazani grafičkim prikazom na sljedećoj slici.



Slika 28. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitanih uzoraka čelika C45

Uzimajući u obzir parametar hrapavosti R_a zaključeno je da postoje neznatne razlike u srednjim vrijednostima parametara, jer se sve vrijednosti nalaze ispod $1 \mu\text{m}$ (odnosno od 0,47 – 0,82). Međutim, za zadržavanje niskih vrijednosti parametra R_a , najboljim su se pokazali toplinski neobrađeni uzorak i vanadirani uzorak, koji imaju iste vrijednosti parametra R_a ($0,47 \mu\text{m}$). Uzimajući u obzir sva 4 parametara hrapavosti zaključeno je da su se najboljim pokazali prvenstveno vanadirani uzorak zbog stvaranja tvrdih VC karbida, međutim, gledajući sliku 28. može se reći da je relativno dobar se pokazao i toplinski neobrađeni uzorak, jer osim parametra R_{max} , u preostala 3 parametra pokazao je neznatno veće vrijednosti, dok je kod R_q parametra pokazao čak i najniže vrijednosti parametra. Dobivene vrijednosti parametara hrapavosti tipične su za slojeve dobivene postupcima nitrokarburiranja, boriranja, odnosno vanadiranja.

5.2.2 Ispitivanje faktora trenja i otpornosti na trošenje adhezijom

Ovo ispitivanje provodilo se na uređaju za ispitivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje, u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje se provodilo 60 s po tri puta za svaki uzorak, tijekom kojih se svakih 10 s očitavala vrijednost progiba opruge. Progib elastične opruge mijenjao se zavisno od tangencijalne sile koja se pojavljuje u tarnom paru:

- ispitni uzorak
- polirani klizni prsten ležaja

Faktor trenja potreban za ovo ispitivanje dobiva se iz omjera tangencijalne i normalne sile prema već spomenutoj jednadžbi (2)

Normalna sila je konstantna tijekom cijelog ispitivanja i iznosila je:

$$F_n = 98,1 \text{ [N]} \quad (6)$$

Nakon provođenja postupka, i njegovog ponavljanja, vrijednosti za tangencijalne sile (ovim putem dobili smo ih tri) za svakih 10 s, dobili smo uvrštavanjem u diferencijsku jednadžbu (7), odnosno (8), eksperimentalno određenu baždarenjem elastičnog pera na uređaju za ispitivanje adhezijskog trošenja.

$$F_t = 5,6885 \times \Delta L - 1,6294, [\text{N}] \quad (7)$$

$$F_t = |6,4866 \times \Delta L - 10,138|, [\text{N}] \text{ (naknadno HT)} \quad (8)$$

Zatim se za svaki uzorak uvrštavanjem dobivenih vrijednosti za tangencijalne sile, u jednačbu (2), dobila vrijednost faktora trenja nakon svakih 10 s, iz kojih se određuje srednja vrijednost faktora trenja za konstruiranje dijagrama ovisnosti faktora trenja o putu (trošenja adhezijom). Put trošenja za svakih 10 s ispitivanja, dobije se iz jednačbe (9) i (10):

$$S = V \cdot t \quad (9)$$

odnosno:
$$S = \frac{(d \cdot \pi \cdot n)}{60} \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

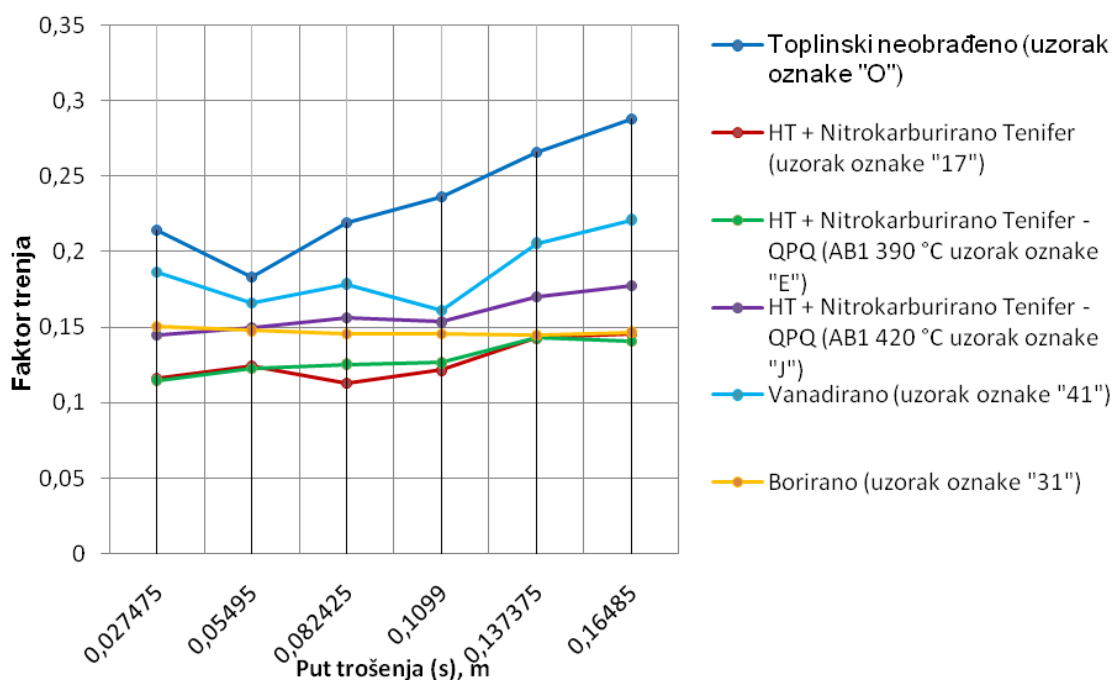
t – vrijeme određivanja progiba opruge (svakih 10 s, ukupno 60 s)

v – brzina okretanja ispitnog prstena [m/s]

d – promjer ispitnog prstena: 35 mm

n – broj okretaja ispitnog prstena: 1,5 °/min

Rezultati ispitivanja faktora trenja navedeni su prilogu 2. i prikazani na slikama 29. i 30.



Slika 29. Vrijednosti faktora trenja kod različitih postupaka modificiranja površine bez primjene kaljenja i popuštanja

Iz rezultata ispitivanja faktora trenja ispitanih na slici 32. može se zaključiti sljedeće:

- Uzorak koji je toplinski neobrađen pokazuje relativno visok faktor trenja od 0,18 do 0,28.
- Uzorak na kojem je primijenjen postupak nitrokarburiranja u solnoj kupci (TENIFER) u odnosu na toplinski neobrađen uzorak pokazuje znatno niže vrijednosti faktora trenja (0,11 do 0,14).

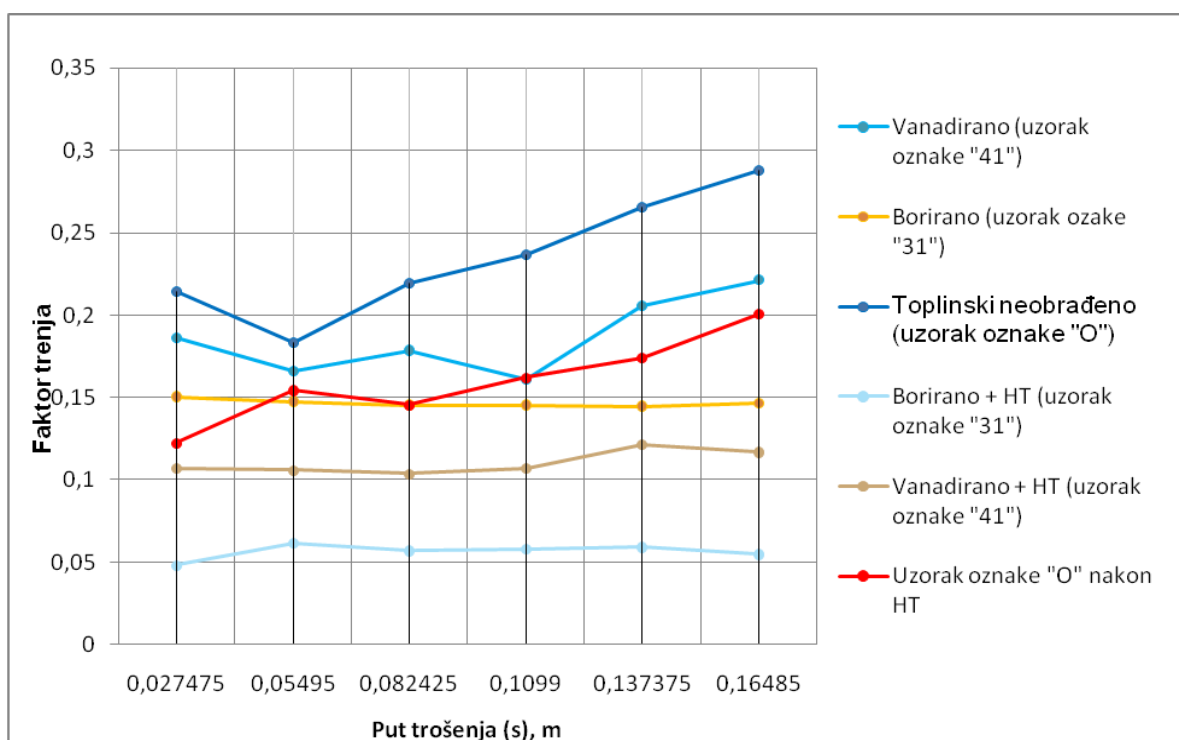
- U odnosu na prethodna dva navedena uzoraka, uzorak oznake "J", nad kojim je provedena toplinska obrada: HT + Tenifer – QPQ (AB1 420 °C), pokazuje relativno manji faktor trenja (0,14 do 0,17) u odnosu na toplinski neobrađeni uzorak. U usporedbi sa uzorkom oznake "17", uzorak Tenifer – QPQ (AB1 420 °C) pokazuje više vrijednosti faktora trenja. U usporedbi s drugim ispitnim uzorkom nitrokarburiranja i naknadne oksidacije na temperaturi 390 °C (oznake "E") pokazuje se manji iznos faktora trenja ako je temperatura naknadne oksidacije niža (390 °C)
- Uzorak "41" nakon vanadiranja, pokazao je relativno visoke vrijednosti faktora trenja (0,16 do 0,22), više od svih provedenih postupaka modificiranja površine, a nešto niži faktor trenja od toplinsko neobrađenog uzorka. Ovo je vjerojatno posljedica visoke tvrdoće vanadiranog sloja i značajnog trošenja kliznog prstena koji je izrađen od kaljenog i popuštenog čelika za ležaje.
- Borirani ispitni uzorak oznake "31" pokazao je faktor trenja između 0,144 do 0,15 i vrlo ujednačeno adhezijsko trošenje.

S obzirom na sve prethodno navedeno, može se zaključiti da su za dobivanje što nižih vrijednosti faktora trenja, iako između svih provedenih metoda nisu velike razlike u vrijednostima, najbolje metode modificiranja površina:

- Nitrokarburiranje postupkom Tenifer
- Nitrokarburiranje s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer – QPQ (AB1 390 °C)

U drugoj seriji ispitivanja ispitni uzorci oznaka "O" (polazno stanje), "31" (borirani uzorak), "41" (vanadirani uzorak) su podvrgnuti kaljenju i popuštanju (poboljšavanje). Nakon poboljšavanja provedena su ponovna ispitivanja faktora trenja, a rezultati ovih ispitivanja se nalaze u prilogu 2. i prikazani su na slici 30.

Na ovoj slici radi usporedbe prikazana je i promjena faktora trenja kod istih uzoraka s nekaljivom jezgrom.

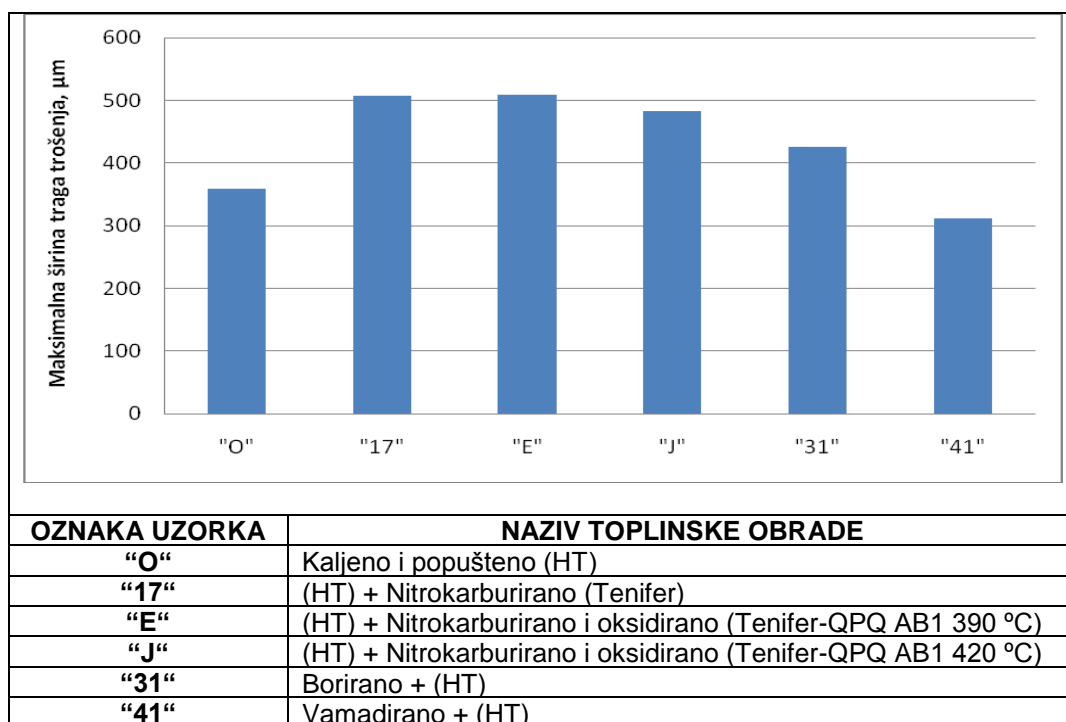


Slika 30. Faktor trenja uzoraka "O, 31, 41" prije i poslije naknadnog poboljšavanja

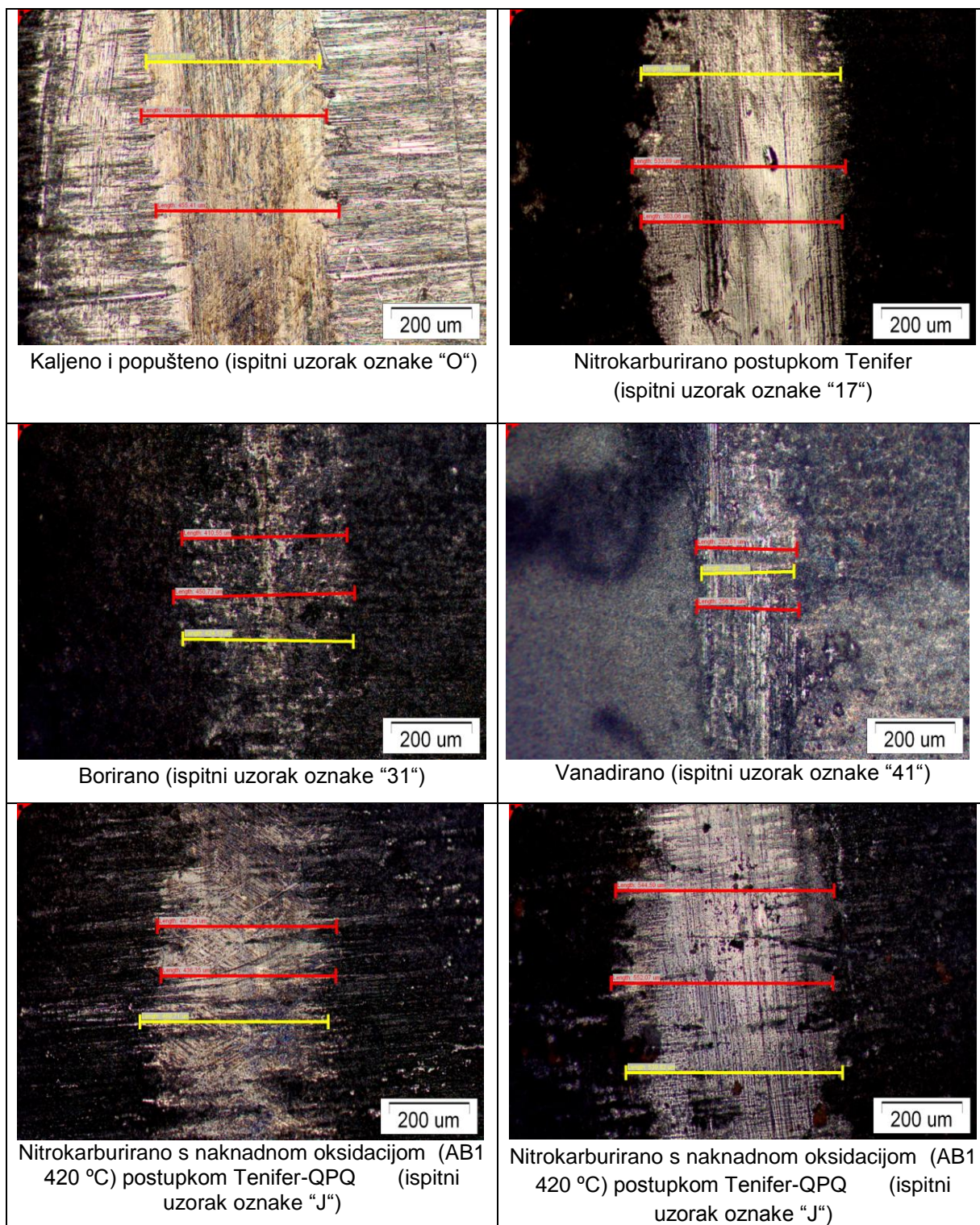
Uzimajući u obzir dobivene vrijednosti faktora trenja koje su navedene u prilogu 2, i što je dobro vidljivo iz slike 30. može se zaključiti da naknadno poboljšavanje dodatno snižava faktor trenja kod svih uzoraka, što je vrlo dobro vidljivo za uzorak "31" kod kojeg su se vrijednosti faktora trenja znatno snizile i iznose: 0,048 do 0,061. Kod kaljenog i popuštenog uzorka oznake "O" i vanadiranog uzorka oznake "41" vrijednosti faktora trenja su se značajno snizile, a kod vanadiranog uzorka i dodatno stabilizirale.

5.2.2.1 Ispitivanje otpornosti na trošenje adhezijom

Nakon provedenih ispitivanja faktora trenja, na uzorcima su nastali vidljivi tragovi trošenja. Pošto se golim okom ne može odrediti širina nastalih tragova trošenja, u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje uzorci su slikani pod svjetlosnim mikroskopom (Olympus GX 51, povećanja 100X), te su se uz pomoć digitalne kamere i software-a za kvantitativnu analizu slika odredile maksimalne širine tragova trošenja uzorka nakon ispitivanja faktora trenja. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje adhezijom prikazani su prilogu 3. i vidljivi su u histogramu na slici 31., a slike tragova trošenja pojedinih uzoraka prikazane su na slici 32.



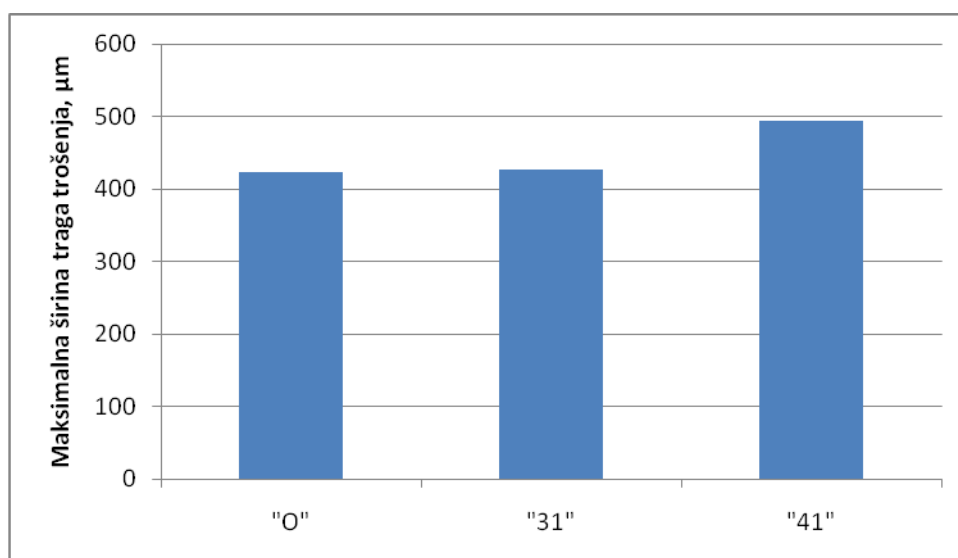
Slika 31. Histogram maksimalne širine traga trošenja uzoraka



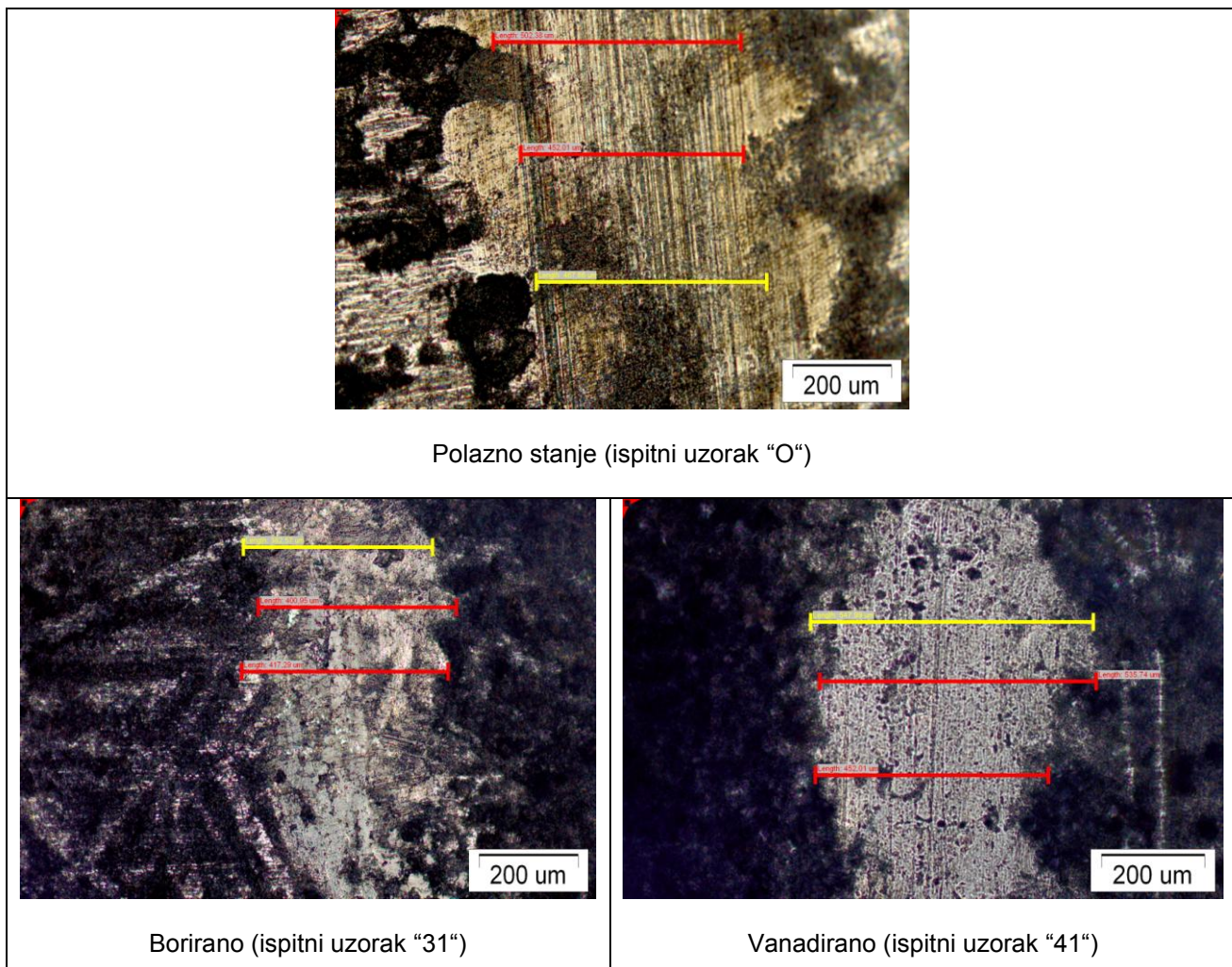
Slika 32. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima nakon 60 s adhezijskih trošenja (0,1648 m) uz silu $F_t = 98,1$ N i brzinu okretanja kliznog prstena $n = 1,5$ %/min

Iz histograma na slici 31. i slike 32, uočava se da je najbolju otpornost na adhezijsko trošenje pokazao uzorak koji je vanadirani. Ispitni uzorci koji su bili obrađeni procesima nitrokarburiranja Tenifer i QPQ (AB1 390 °C) pokazali su jednake vrijednosti širine traga trošenja, te ujedno i najlošiju otpornost na trošenje adhezijom. Nešto bolju otpornost na adhezijsko trošenje u odnosu na prethodno dva navedena procesa pokazao je uzorak "J" obrađen QPQ postupkom na temperaturi oksidativne kupke od 420 °C. Također, uz vanadirani uzorak, zadovoljavajuću otpornost na adhezijsko trošenje, pokazao je relativno iznenađujuće uzorak "O", dok je borirani uzorak s obzirom na stvaranje tvrdih boridnih slojeva, pokazao relativno lošiju otpornost na adhezijsko trošenje od očekivanog.

Nakon ispitivanja adhezijskog trošenja nepoboljšane jezgre, nad uzorcima "O, 31 i 41" naknadno je proveden postupak poboljšavanja (HT), kako bi se vidjelo da li nakon njega dolazi do promjena u jezgri uzoraka, odnosno da li postupak poboljšavanja pridonosi povećanju otpornosti na adhezijsko trošenje. Rezultati su prikazani u prilogu 3 i vidljivi su na slikama 33. i 34.



Slika 33. Histogram maksimalne širine traga trošenja uzoraka nakon naknadnog HT

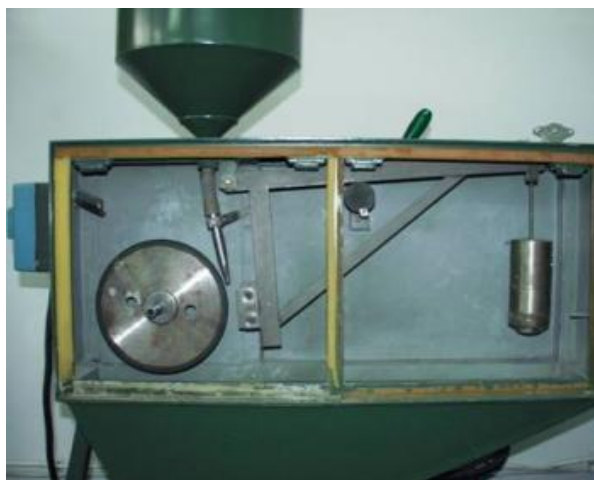


Slika 34. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima (nakon naknadnog poboljšavanja), nakon 60 s adhezijskih trošenja (0,1648 m) uz silu $F_t = 98,1 \text{ N}$ i brzinu okretanja kliznog prstena $n = 1,5 \text{ }^\circ/\text{mi}$

Nakon naknadnog poboljšavanja, uočava se iz slike 33. i 34., da se nakon ispitivanja faktora trenja kod uzoraka "O i 41" znatno povećava širina traga trošenja, tj. smanjuje se otpornost na adhezijsko trošenje, dok se kod uzorka "31" širina traga trošenja tek neznatno povećala. Stoga, može se zaključiti da se naknadno poboljšavanje nije pokazalo utjecajnim na širinu traga trošenja, odnosno na povišenje otpornosti na adhezijsko trošenje.

5.2.3 Ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom

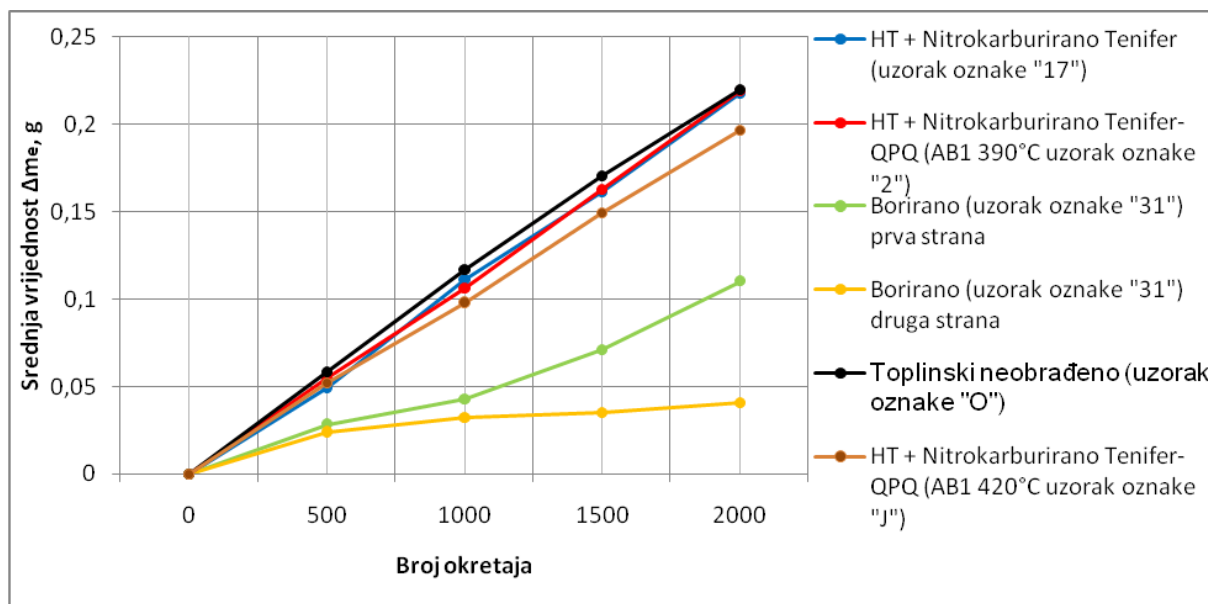
Ovo ispitivanje suhi pijesak-gumeni kotač provodilo se na uređaju prikazanom na slici 35., u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje se provodilo, tako da se uzorak pričvrsti, zatim se uzorak primakne do gumenog kotača tako da oslobodimo uteg, tj opteretimo silom F od 15 N te se nakon toga kroz sapnicu koja je spojena na metalni lijevak, pusti da curi kremeni pijesak oznake B 35 S (proizvođač: "Kema Puconci d.d.") zrnatosti: 0,063 – 0,355 mm po strani uzorka i pokrene gumeni kotač spojen na struju preko elektromotora. Ispitivanje se provodilo do 2000 okretaja gumenog kotača. Nakon svakih 500 okretaja na vagi koja je prikazana na slici 36. određen je gubitak mase u odnosu na početnu masu uzorka. Nakon 2000 okretaja isto ispitivanje provedeno je i za drugu stranu svakog uzorka. Rezultati ispitivanja navedeni su u prilogu 4. i prikazani su u dijagramu na slici 37.



Slika 35. Uređaj za ispitivanje materijala u uvjetima abrazije [22]



Slika 36. Vaga METLLER B5C 1000 [23]



Slika 37. Skup dijagrama ispitanih uzoraka na trošenje abrazijom

Iz rezultata navedenih u prilogu 4. i dijagrama (slika 43.) može se zaključiti sljedeće:

- Toplinski neobrađeni uzorak i uzorci koji su Nitrokarburirani Tenifer i nad kojim je proveden postupak Nitrokarburiranja Tenifer-QPQ (AB1 390 °C) pokazali su najlošije rezultate otpornosti na trošenje abrazijom. Iz dijagrama je vidljivo da su njihove vrijednosti podjednake i da pokazuju skorom linearan rast. Tokom ispitivanja uočeno je da već nakon 500 okretaja, kod navedenih uzoraka dolazi do probijanja površinskog sloja, odnosno dolazi do trošenja jezgre materijala
- U odnosu na prethodno navedene uzorke, Nitrokarburirani Tenifer – QPQ (AB1 420 °C) uzorak pokazao je neznatno bolju otpornost na trošenje abrazijom, što je vidljivo i iz dijagrama.
- Uzorak koji je podvrgnut boriranju pokazuje u odnosu na prethodno dva navedena uzorka bitno bolju otpornost na trošenje abrazijom. Međutim, tokom ispitivanja uočeno je da druga strana uzorka pokazuje bolja svojstva, odnosno otpornost na trošenje abrazijom. Kod prve strane uzorka vidljivo trošenje površinskog sloja pojavilo se nakon 1000 okretaja gumenog kotača (vjerojatno zbog formiranog nepoželjnog Fe₂B borida) dok se kod druge strane uzorka ni nakon 2000 okretaja gumenog kotača nisu pojavila vidljiva trošenja sloja borida. Zbog vidljive razlike u otpornosti na trošenje abrazijom dviju strana boriranog uzorka, za daljnja ispitivanja predviđena je metalografska analiza (mikrorezanje), kako bi se vidjelo zbog čega su tako velike razlike u otpornosti na trošenje abrazijom.

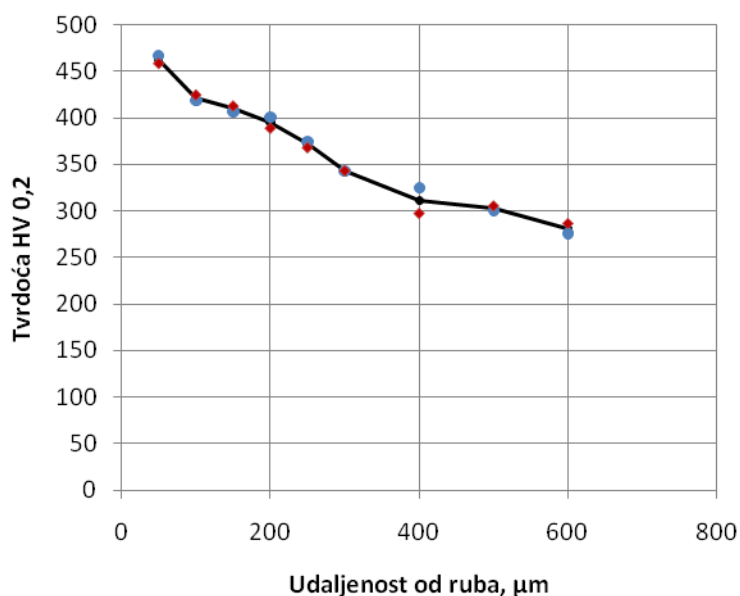
5.2.4 Ispitivanje mikrotvrdoće i metalografska analiza

Metalografska ispitivanja i priprema uzoraka za metalografska ispitivanja provedena su u Laboratoriju za metalografska ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uzorci su prvo bili odrezani Al_2O_3 pločom na mikrarezalici "Accutom – 2 Struers". Nakon rezanja uzorci su zaliveni u akrilnu masu i brušeni brusnim papirima (SiC) granulacije 200, 320, 500 i 600 μm . Nakon svakog brušenja uzorci su oprani u alkoholu i sušeni u struji suhog zraka. Sljedeća dva koraka bila su poliranje, s parametrima navedenim u tablici 9. Uzorci su nakon svakog poliranja ponovno oprani u alkoholu i sušeni u struji suhog zraka. Nakon poliranja slijedila je metalografska analiza prije koje su uzorci nagriženi nitalom (1% HNO_3 u etilnom alkoholu) i osušeni u struji suhog zraka. Tako pripremljeni uzorci su potom promatrani na svjetlosnom mikroskopu, te su fotografirani.

Tablica 9. Parametri poliranja

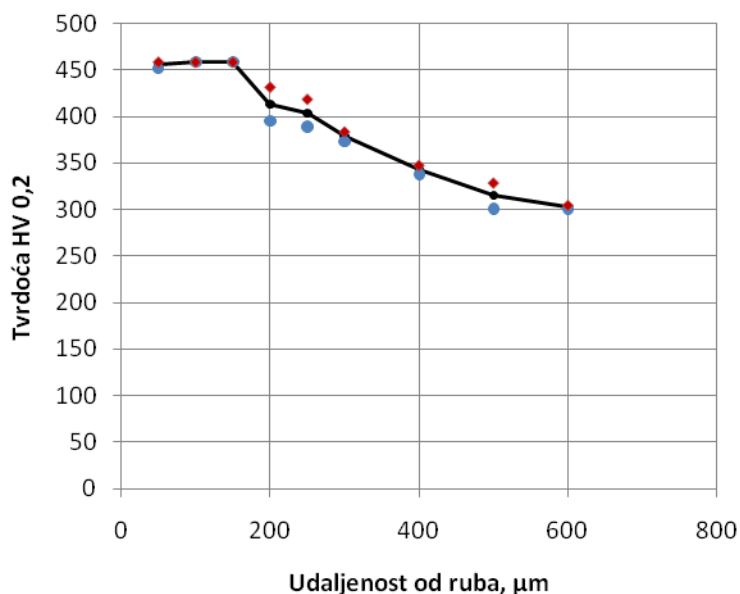
1.POLIRANJE		FINO ZAVRŠNO POLIRANJE	
Podloga	Pan – W	Podloga	Op - Chm
Dijamantna pasta, μm	6	Dijamantna pasta, μm	1
Vrijeme, min	7	Vrijeme, min	5
Pritisak, N	25	Pritisak, N	25
Lubrikant	Blue	Lubrikant	Blue

Tijekom metalografskih ispitivanja provedeno je i ispitivanje mikrotvrdoće na metalografski pripremljenim uzorcima, po poprečnom presjeku uzorka od ruba prema jezgri. Ispitivanje je provedeno Vickersovom metodom HV0,2 na mikrotvrdomeru "Tuhon 2100 B" (Instron Corporation USA) uz opterećenje (1,962 N) na temperaturi prostorije 22°C. Navedeni mikrotvrdomer ima mjernu nesigurnost mjerenja dijagonale otiska $\pm 2 \%$. Rezultati ispitivanja navedeni su u prilogu 5. A vidljivi su na slikama 38, 39, 40 i 41.



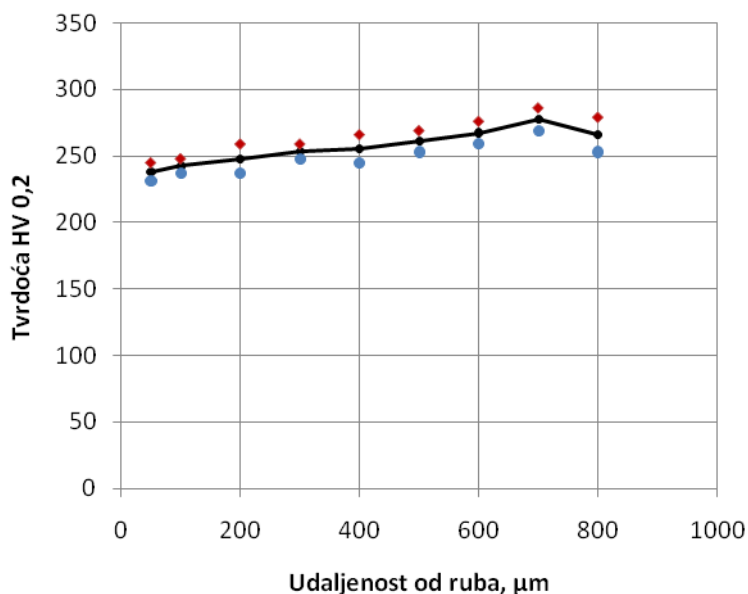
Slika 38. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom nitrokarburiranja Tenifer

Na slici 38. prikazan je raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom nitrokarburiranja Tenifer. Promatranjem rasporeda tvrdoća, vidljivo je da uzorak obrađen navedenim postupkom pokazuje relativno visoku tvrdoću po cijelom presjeku. Bitno je napomenuti da tvrdoća opada što je veća udaljenost od ruba sloja, odnosno približavanjem jezgri materijala.



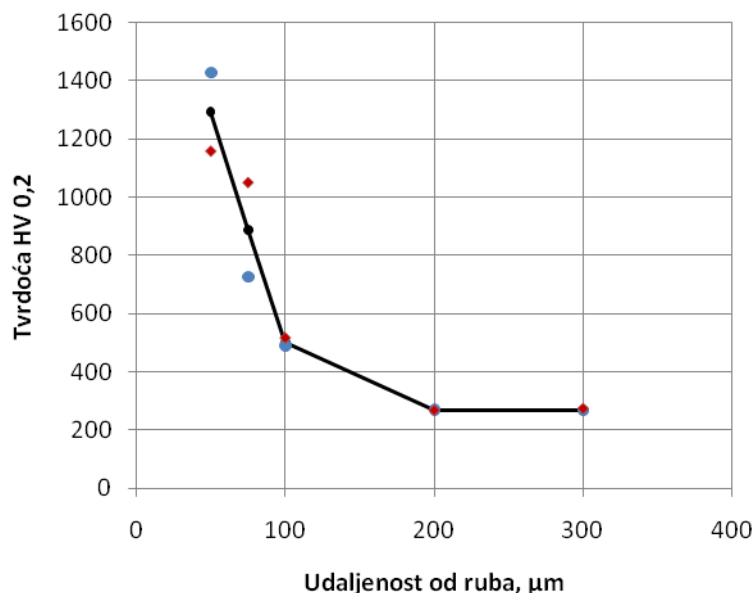
Slika 39. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog nitrokarburiranjem s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer QPQ (AB1 390°C)

Na slici 39. prikazan je raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog nitrokarburiranjem s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer QPQ (AB1 390°C). Promatranjem rasporeda tvrdoća, vidljivo je da uzorak obrađen navedenim postupkom kao i prethodni uzorak (slika 38) pokazuje relativno visoku tvrdoću po cijelom presjeku. Također tvrdoća opada što je veća udaljenost od ruba sloja, odnosno približavanjem jezgri materijala.



Slika 40. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom vanadiranja u solnoj kupci

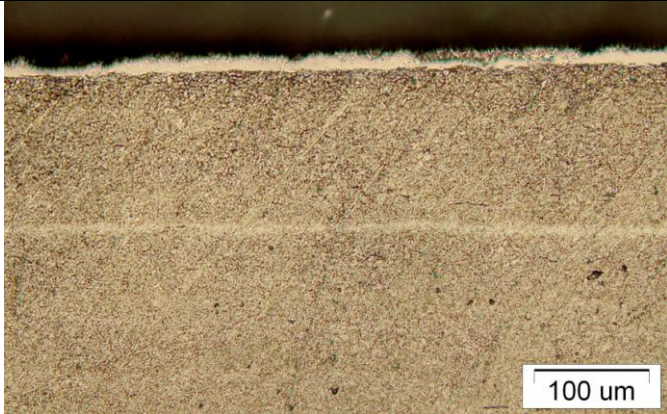
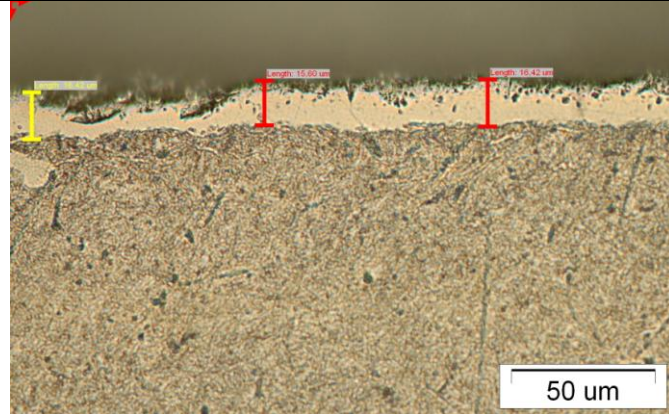
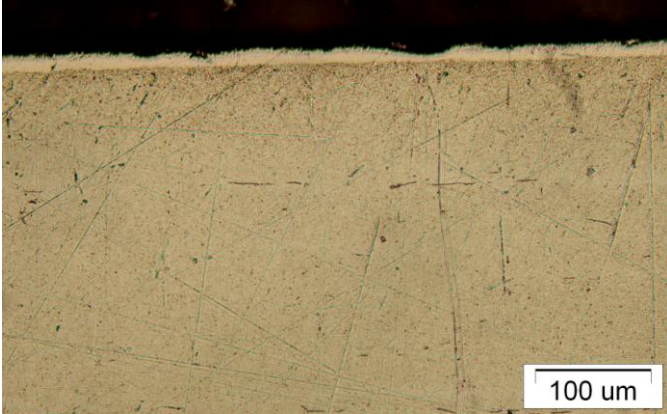
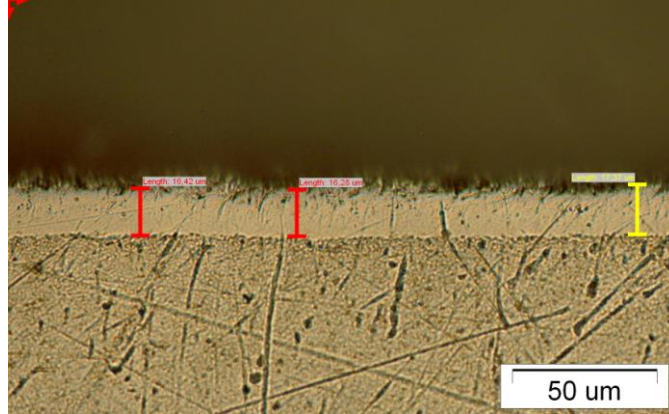
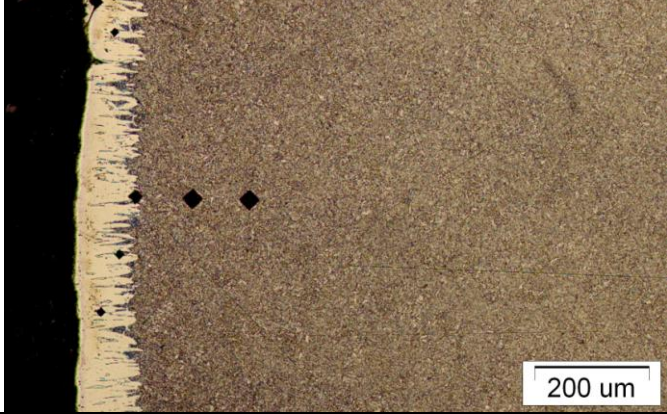
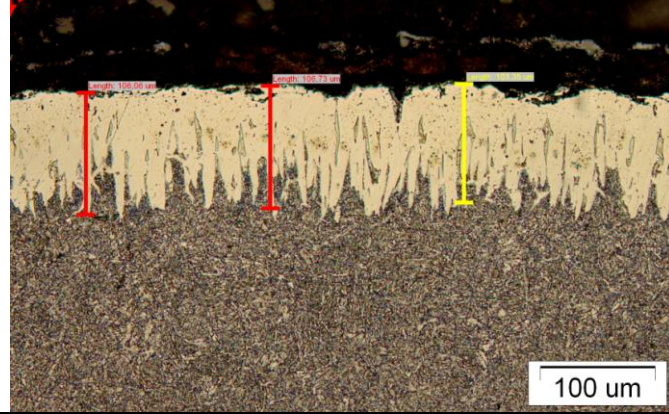
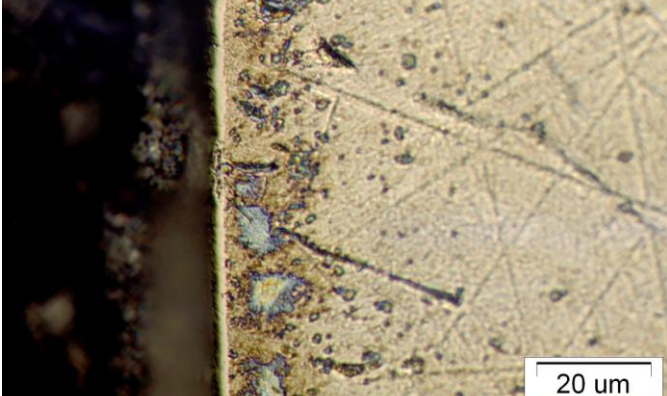

Na slici 40 vidljivo je da se kod postupka vanadiranja tvrdoća povećava s što većom udaljenošću od ruba površinskog sloja, odnosno približavanjem jezgri materijala. Kao što je vidljivo ovo je obrnut slučaju u odnosu na prethodno dva opisana postupaka. Ovo se događa zbog razugličenja rubnog sloja. Usporedbom svih ispitanih uzoraka (odabranih postupaka) vidljivo je da je kod vanadiranog uzorka utvrđena najmanja mikrotvrdoća, što je relativno iznenađujuće, jer se zna iz poglavlja 4.3.1 da se nakon vanadiranja formira tvrdi karbidni sloj tvrdoće: 3200 – 3800 HV.



Slika 41. Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku ispitnog uzorka od čelika C45 obrađenog postupkom boriranja u prašku

Kod boriranog uzorka (slika 41), utvrđena je najveća mikrotvrdoća (max. 1429 HV), što je iz već navedenog u poglavlju 4.2 bilo i za očekivati. Međutim iz dijagrama je vidljiv izraziti pad s većom udaljenošću od ruba površinskog sloja, jer nakon već 300 μm tvrdoća iznosi 266 μm , što je relativno mala tvrdoća jer je na istoj udaljenosti od rubnog sloja, kod nitrokarburiranog uzorka postupkom Tenifer, utvrđena tvrdoća od 343 HV.

Tablica 10. Mikrostruktura ispitnih uzoraka obrađenih postupkom Tenifer, nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom postupkom Tenifer QPQ, postupkom boriranja u prašku i postupkom vanadiranja u solnoj kupci, nagriženo sa 1% - tnim nitalom.

Nitrokarburirano postupkom Tenifer: TF1 580 °C/2h/	
	
Nitrokarburirano postupkom Tenifer QPQ:TF1 580 °C/2h/AB1 390 °C/0,5h/voda + poliranje + AB1 390 °C /0,5h/voda	
	
Borirano: EKABOR-1/900 °C/4h/peć + KALJENJE 450 °C/0,5h / 850 °C / 0,5h /voda + popuštanje 600	
	
Vanadirano: 900 °C/4h/ulje + KALJENJE 450 °C/30min/ 850 °C/0,5h/voda + popuštanje 600 °C/2h/zrak	
	

Iz tablice 10 vidljivo je da se postupkom Tenifer dobila homogena zona spojeva. Svjetlosnim mikroskopom nisu se uočile promjene u difuzijskoj zoni zbog ohlađivanja u vodi. Kod uzorka obrađenog postupkom Tenifer – QPQ pri većem povećanju (500x) uočava se difuzijska zona s izlučenim iglicama nitrida. Ovakva igličasta struktura nepovoljno utječe na svojstva dinamičke izdržljivosti. Izlučivanje Fe - nitrida posljedica je držanja uzorka u kupki AB1 na temperaturi 390 °C. Prema slikama u tablici uočava se da je kod postupaka Tenifer i Tenifer – QPQ dobivena zona spojeva s porama do oko polovine njene ukupne debljine. Mjerenjem na analizatoru slike utvrđena je srednja debljina zone spojeva kod ispitnih uzoraka obrađenih postupkom Tenifer od 16 µm, a kod postupka Tenifer – QPQ 16,7 µm, stoga se može zaključiti da postupak Tenifer – QPQ neznatno pridonosi povećanju debljine zone spojeva.

Iz tablice se vidi da se kod boriranog ispitnog uzorka, nakon provođenja postupka dobio jednofazni površinski sloj koji se sastoji samo od FeB borida. Izmjerena srednja debljina sloja iznosi 105 µm. Prilikom promatranja ispitnog uzorka na svjetlosnom mikroskopu nisu uočene nikakve pukotine, nečistoće ili odlupljivanje boridnog sloja.

Kod vanadiranog uzorka uočeno je da se krhak vrlo tanak vanadirani sloj otkinuo, vjerojatno kod rezanja uzorka za metalografsku analizu, te zbog toga nismo mogli izmjeriti debljinu sloja jer se na svjetlosnom mikroskopu nije mogao vidjeti nigdje kompaktan površinski sloj uzorka. Na slici povećanja 1000x uočene su mnoge nesavršenosti, pukotine, te je došlo do paljenja (navarivanja) sloja, vjerojatno isto tako prilikom rezanja.

5.2.5 Rangiranje ispitanih slojeva prema otpornosti na trošenje

Tablica 11. Mehanička svojstva i otpornost na trošenje ispitanih slojeva

Ispitano stanje	Debljina sloja ili dubina modificiranja, μm	Povećanje hrapavosti u odnosu na polazno stanje, μm	Faktor trenja	Širina traga trošenja, μm	Gubitak mase abrazijom, mm
Kaljeno	0	0	0,18-0,28 0,12-0,20	358,67 424,09	0,22
Nitrokarburirano (Tenifer)	16	6,48	0,11-0,14	506,91	0,21
Nitrokarburirano i oksidirano (Tenifer QPQ, AB1 390 °C)	16,7	8,0675	0,11-0,139	509,65	0,21
Nitrokarburirano i oksidirano (Tenifer QPQ, AB1 420 °C)	/	7,8033	0,14-0,17	482,22	0,19
Borirano	105	4,8275	0,14-0,15 0,04-0,06	425,99 426,21	0,04
Vanadirano	/	3,9266	0,16-0,22 0,10-0,12	312,03 494,21	/

Zaključak

Površinski modificirani strojni dijelovi i alati danas u sve većem broju slučajeva moraju biti otporni na trošenje adhezijom i abrazijom. Iz dostupne literature zapaženo je da u potpunosti nije istražena otpornost na trošenje površinskih slojeva dobivenih uobičajenim postupcima toplinsko – kemijske obrade: nitriranje, nitrokarburiranje Tenifer, Tenifer – QPQ nje, boriranje, a osobito postupak vanadiranja, koji je relativno noviji postupak modificiranja površina. U teorijskom dijelu rada analizirani su i opisani glavni utjecajni čimbenici na otpornost na trošenje čelika površinski modificiranog postupcima nitriranja, nitrokarburiranja Tenifer, nitrokarburiranja s naknadnom oksidacijom (Tenifer - QPQ), boriranja i vanadiranja. Prema navodima literature najotpornijima na trošenje (adhezija, abrazija) površinski slojevi dobiveni postupkom vanadiranja i boriranja zbog stvaranja jakih karbidnih slojeva .

U eksperimentalnom dijelu rada, planirani su i provedeni pokusi u cilju određivanja mehaničkih i triboloških svojstava tipičnih slojeva proizvedenih odabranim postupcima modificiranja površine. Provedena su sljedeća ispitivanja: ispitivanje hrapavosti, ispitivanje otpornosti na abraziju, na adheziju i određivanje faktora trenja te metalografska ispitivanja ispitnih uzoraka od čelika C45 u polaznom stanju i nakon provedenih odabranih postupaka modificiranja površine. Na osnovi dobivenih rezultata uspoređena su postignuta svojstva slojeva i predložena njihova primjena, te se na osnovu njih zaključuje sljedeće (tablica 11.).

- Najmanje povećanje svih parametara hrapavosti u odnosu na polazno stanje (poboljšano) postignuto je kod postupka vanadiranja, ali iako su kod postupka boriranja uočena veća povećanja hrapavosti u odnosu na postupak vanadiranja, zbog neznatno većih vrijednosti postupak boriranja isto možemo smatrati jednim od boljih postupaka što se tiče povećanje hrapavosti površine u odnosu na polazno stanje. Najveće povećanje svih parametara hrapavosti površine u odnosu na polazno stanje pokazali su postupci nitrokarburiranja Tenifer i nitrokarburiranja Tenifer - QPQ. Stoga su postupci vanadiranja i boriranja posebno prikladani za alate i strojne dijelove koji se prije toplinsko – kemijske obrade strojno obrađuju na konačne dimenzije.
- Kod ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje uočava se da je najbolju otpornost na adhezijsko trošenje pokazao postupak vanadiranja. Postupci nitrokarburiranja Tenifer i Tenifer QPQ (AB1 390 °C) pokazali su jednake vrijednosti širine traga trošenja, te ujedno i najlošiju otpornost na trošenje adhezijom. Nešto bolju otpornost na adhezijsko trošenje u odnosu na prethodno dva navedena postupaka pokazao je postupak Tenifer QPQ (AB1 420 °C). Također, uz postupak vanadiranja, zadovoljavajuću otpornost na adhezijsko trošenje, pokazalo je relativno iznenađujuće polazno stanje, dok je postupak boriranja s obzirom na stvaranje tvrdih boridnih slojeva, pokazao relativno lošiju otpornost na adhezijsko trošenje od očekivanog.

Nakon ispitivanja adhezijskog trošenja nepoboljšane jezgre, nad uzorcima "O, 31 I 41" naknadno je proveden postupak poboljšavanja (HT), kako bi se vidjelo da li nakon njega dolazi do promjena u jezgri uzoraka, odnosno da li postupak poboljšavanja pridonosi povećanju otpornosti na adhezijsko trošenje. Zaključeno je sljedeće:

- Nakon naknadnog poboljšavanja, uočeno je da se nakon ispitivanja faktora trenja kod uzoraka koji su vanadirani i kod polaznog stanja znatno povećava širina traga trošenja, tj. smanjuje se otpornost na adhezijsko trošenje, dok se kod uzorka nad kojim je proveden postupak boriranja širina traga trošenja tek neznatno povećala. Stoga, može se zaključiti da se naknadno poboljšavanje nije pokazalo utjecajnim na širinu traga trošenja, odnosno na povišenje otpornosti na adhezijsko trošenje.

- Kod ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje uočeno je da su polazno stanje i postupci nitrokarburiranja Tenifer i Tenifer QPQ (AB1 390 °C) pokazali najlošije rezultate otpornosti na trošenje abrazijskom. U odnosu na prethodno navedene postupke, postupak nitrokarburiranja Tenifer QPQ (AB1 420 °C) pokazao je neznatno bolju otpornost na trošenje abrazijskom, što je vidljivo i iz dijagrama na slici 37. Uzorak koji je podvrgnut postupku boriranja, pokazuje u odnosu na prethodno dva navedena postupka bitno bolju otpornost na trošenje abrazijskom. Međutim, tokom ispitivanja uočeno je da druga strana uzorka pokazuje bolja svojstva, odnosno otpornost na trošenje abrazijskom što je već navedeno u poglavlju 5.2.3 .

U daljnjim ispitivanjima preporučuje se :

- Zbog vidljive razlike u otpornosti na trošenje abrazijskom dviju strana boriranog uzorka, za daljnja ispitivanja predviđena je metalografska analiza (mikrorezanje), kako bi se vidjelo zbog čega su tako velike razlike u otpornosti na trošenje abrazijskom.
- Provesti ispitivanja na trošenje erozijom

Literatura

- [1] Grilec K., Predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina", dio Tribologija, FSB, Zagreb, 2009.
- [2] Ivušić V., Tribologija, FSB, Zagreb, 1998.
- [3] Cajner F. Predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina", dio Inženjerstvo površina, FSB, Zagreb, 2009.
- [4] Burakowski T., Wierzchon T., Surface Engineering of Metals: principles, equipment, technologies, LLC, Florida, USA, 1999.
- [5] Stupnišek M., Predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina", dio Inženjerstvo površina, FSB, Zagreb, 2009.
- [6] Liščić B., Stupnišek M., Cajner F., Filetin T, Toplinska obrada – praktikum, FSB, Zagreb, 1991.
- [7] Gašparić I., Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2003.
- [8] Peharec I., Završni rad, FSB, Zagreb, 2009.
- [9] www.nitrex.com
- [10] Krumes D., Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina, SI.brod, 2004.
- [11] Krumes D., Toplinska obrada, SI.brod, 2000.
- [12] Klumper H., Westkamp, Hoffmann F. und Mayr P.: Nitrierschichtbildung und kohlenstoffdiffusion in abhangigkeit von der nitrierkennzahl, HTM 44, (1989)2, 346 – 355.
- [13] www.durferrit.de/en/produkte/waermebehandlung/nitrocarbonitrieren.htm
- [14] www.bortec.de/boronizing.htm
- [15] www.richterprecision.com/boronizing.htm
- [16] Landek D., Vanadium carbide coating process pdf.
- [17] Novosel M., Osnove toplinske obrade, IP 4, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [18] Matijević B., Stupnišek M., Diffusion coating with wear resistant carbide layers, Transactions of famena XXVI – 2, 2002., str. 67 – 74
- [19] Matijević B., Stupnišek M., Oplemenjivanje alata tvrdim karbidnim slojem, Zbornik radova, 1998.
- [20] www.td.co.za/td.html
- [21] Matijević B., Stupnišek M., Application of vanadizing process for tools and dies pdf., FSB, Zagreb
- [22] www.fsb.hr/zavod_zm_materijale/index.php?menu=20&action=6
- [23] Prusac D., Magistarski rad, FSB, Zagreb, 2007.

PRILOG 1. Rezultati ispitivanja hrapavosti površine prijenosnim uređajem Mitutoyo SJ – 201

Parametri hrapavosti		Oznaka uzorka						
		O	BRUŠENO "O"	17	E	J	31	41
R _a , μm	1	0,42	0,73	0,71	0,76	0,78	0,63	0,53
	2	0,47	0,74	0,72	0,97	0,72	0,61	0,41
	3	0,42	0,71	0,48	0,70	0,82	0,66	0,48
	4	/	/	/	0,84	/	0,69	/
	X _{Sr}	0,4366	0,7266	0,6366	0,8175	0,7733	0,6475	0,4733
R _z , μm	1	3,32	4,66	5,69	5,92	6,11	3,83	3,46
	2	3,47	4,87	4,64	8,10	5,47	4,26	2,45
	3	4,0	4,63	3,62	5,20	6,25	4,79	3,44
	4	/	/	/	6,69	/	4,22	/
	X _{Sr}	3,5966	4,72	4,65	6,4775	5,9433	4,2750	3,1660
R _{max} , μm	1	4,78	5,01	8,46	7,50	7,33	4,36	4,48
	2	4,18	5,63	5,75	9,56	6,71	4,39	3,17
	3	5,92	5,53	5,23	6,38	9,37	5,66	4,13
	4	/	/	/	8,83	/	4,90	/
	X _{Sr}	4,96	5,39	6,48	8,0675	7,8033	4,8275	3,9266
R _q , μm	1	0,57	0,90	0,93	0,98	1,01	0,76	0,67
	2	0,60	0,91	0,89	1,27	0,91	0,78	0,50
	3	0,57	0,87	0,60	0,90	1,00	0,83	0,61
	4	/	/	/	1,10	/	0,84	/
	X _{Sr}	0,58	0,9266	0,8066	1,0625	0,9733	0,8025	0,5933

UZORAK "O" - Toplinski neobrađeno

UZORAK BRUŠENO "O" - Toplinski neobrađeno + brušeno

UZORAK "17" - Nitrokarburirano Tenifer

UZORAK "E" - Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 1

UZORAK "J" - Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 2

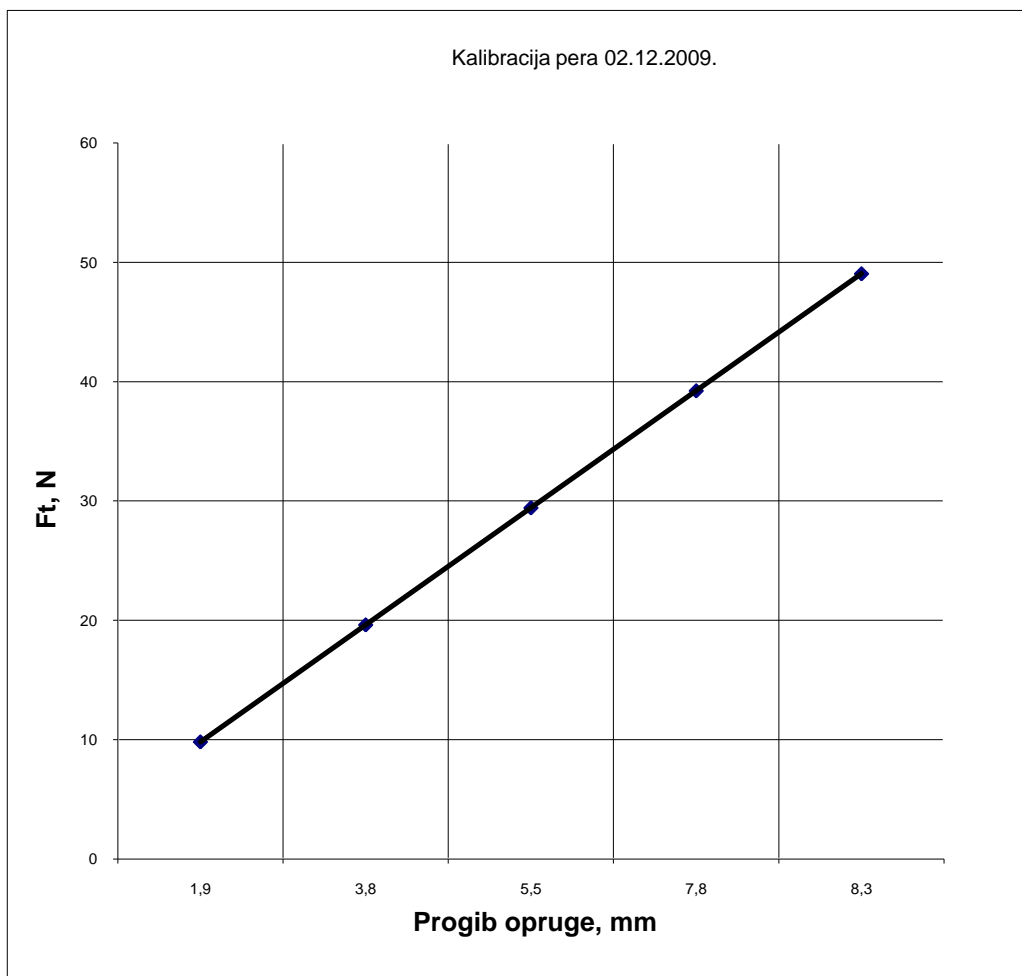
UZORAK "31" - Borirano

UZORAK "41" - Vanadirano

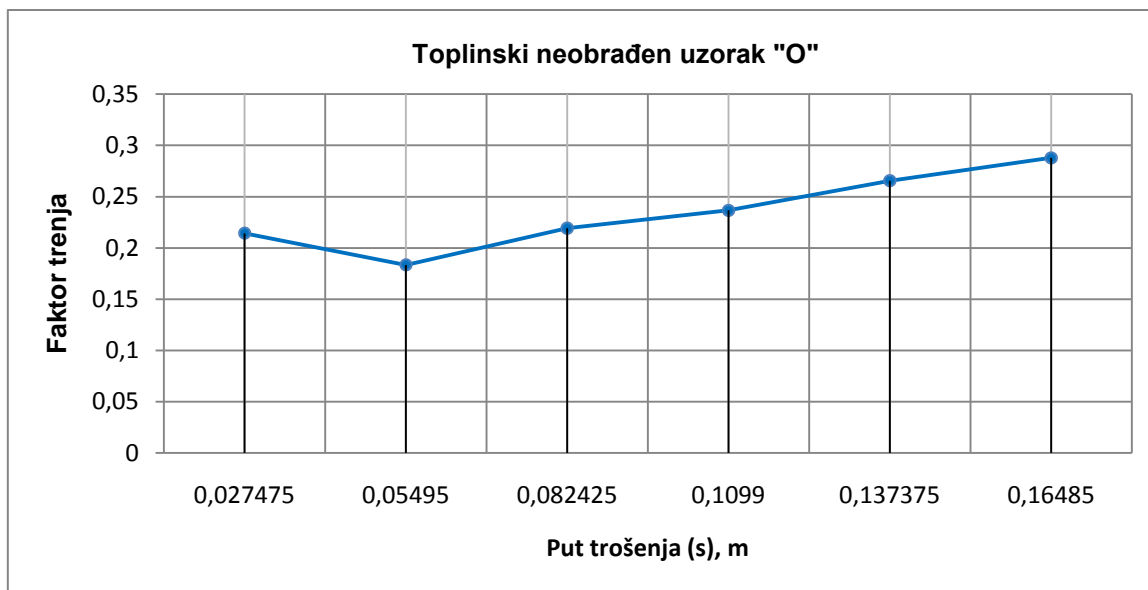
PRILOG 2. Rezultati ispitivanja faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje

Baždarenje elastičnog pera (prije naknadnog poboljšavanja uzoraka "O, 31, 41")

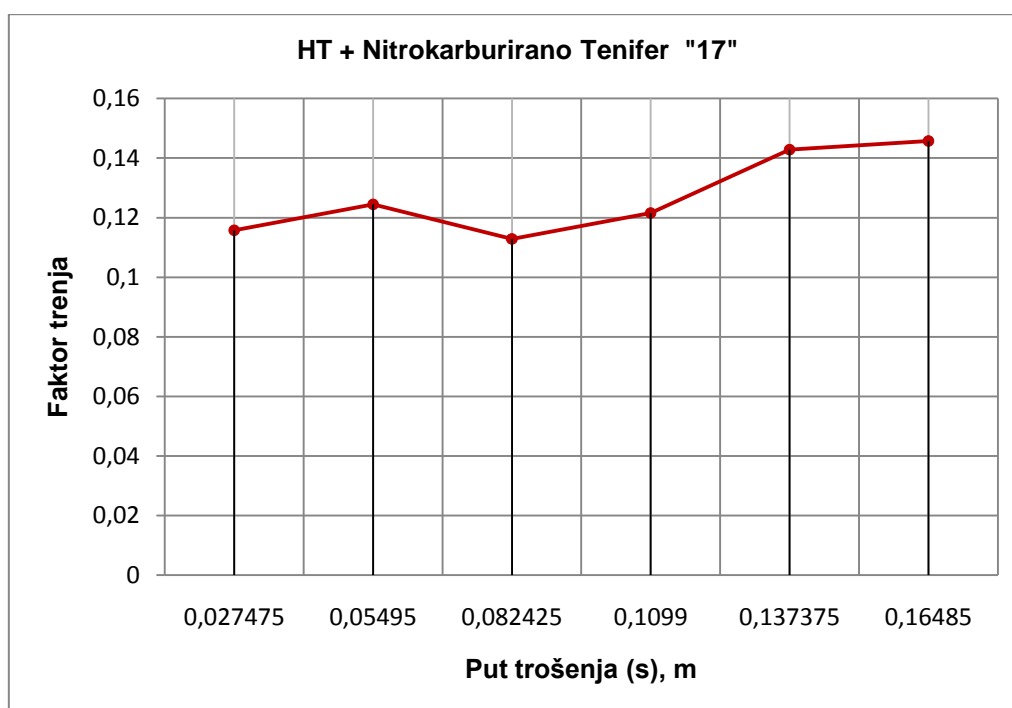
m, [kg]	$F_t = m \cdot 9,81$, [N]	ΔL , [mm]
1	9,81	1,9
2	19,62	3,8
3	29,43	5,5
4	39,24	7,8
5	49,05	8,3



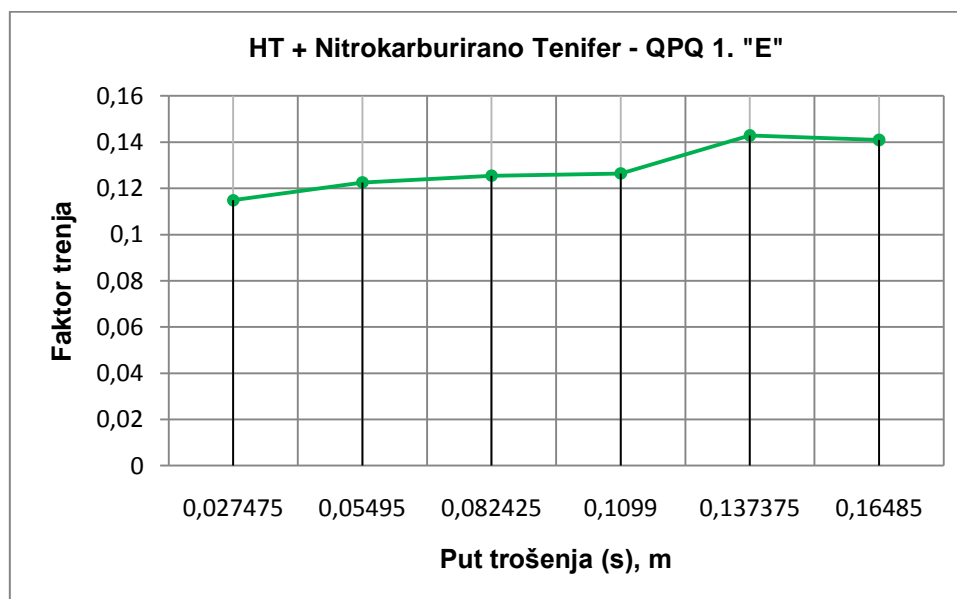
Toplinski neobrađen uzorak "O"												
t, [s]	Broj mjerenja			F_n , [N]	F_{t1} , [N]	F_{t2} , [N]	F_{t3} , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3		1	2	3	1	2	3		
10	3,90	4,35	3,70	98,1	20,56	23,12	19,42	0,2095	0,2356	0,1979	0,2144	0,0275
20	3,55	3,40	3,40	98,1	18,56	17,71	17,71	0,1892	0,1805	0,1805	0,1834	0,0549
30	3,80	4,10	4,30	98,1	19,99	21,69	22,83	0,2037	0,2211	0,2327	0,2192	0,0824
40	4,40	4,90	3,80	98,1	23,40	26,24	19,99	0,2385	0,2675	0,2037	0,2366	0,1099
50	5,50	3,90	5,20	98,1	29,66	20,56	27,95	0,3023	0,2095	0,2849	0,2656	0,1374
60	5,55	5,30	4,90	98,1	29,49	28,52	26,24	0,3052	0,2907	0,2675	0,2878	0,1649



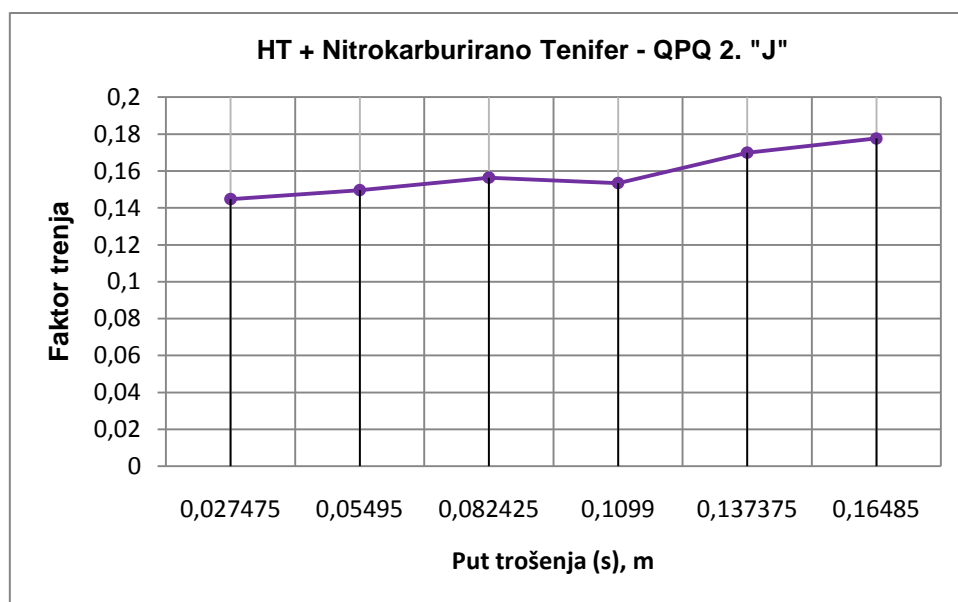
HT + Nitrokarburirano Tenifer, uzorak "17"												
t, [s]	Broj mjerenja			F_n , [N]	F_t , [N]			Faktor trenja			Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3		1	2	3	1	2	3		
10	1,90	2,70	2,25	98,1	9,18	13,73	11,17	0,0936	0,1399	0,1139	0,1158	0,0275
20	2,0	2,80	2,50	98,1	9,75	14,29	12,59	0,0994	0,1457	0,1283	0,1245	0,0549
30	2,0	2,30	2,40	98,1	9,75	11,45	12,02	0,0994	0,1168	0,1226	0,1129	0,0824
40	2,10	2,40	2,65	98,1	10,32	12,02	13,45	0,1052	0,1225	0,1371	0,1216	0,1099
50	2,40	3,0	2,85	98,1	12,02	15,44	14,58	0,1226	0,1573	0,1486	0,1428	0,1374
60	2,60	2,90	2,90	98,1	13,16	14,87	14,87	0,1342	0,1515	0,1515	0,1457	0,1648



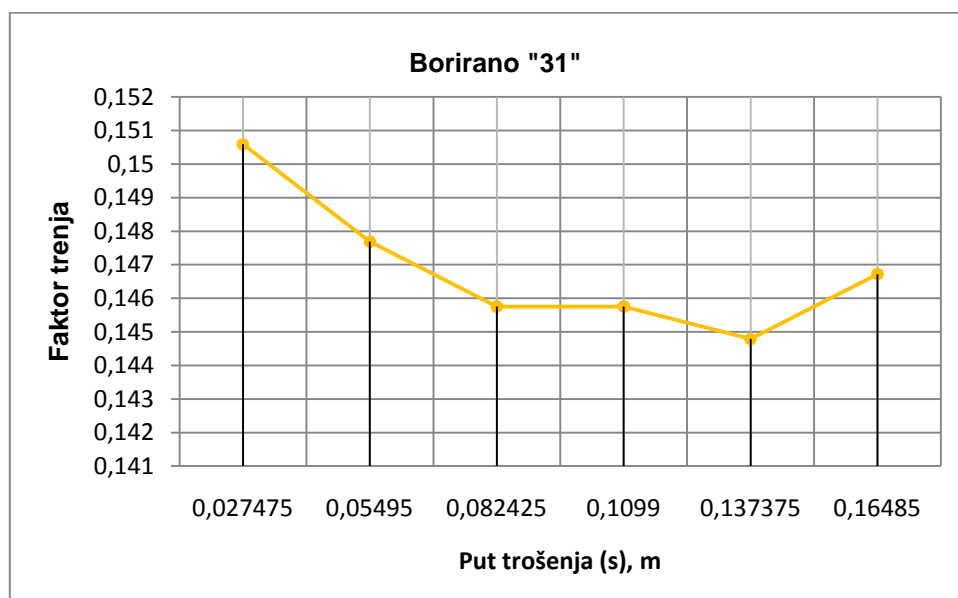
HT + Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 1 , uzorak "E"												
t, [s]	Broj mjerenja			F _n , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3									
10	2,40	2,05	2,35	98,1	12,02	10,03	11,74	0,1226	0,1022	0,1197	0,1148	0,0275
20	2,80	2,05	2,35	98,1	14,29	10,03	11,74	0,1457	0,1022	0,1197	0,1226	0,0549
30	2,60	2,20	2,55	98,1	13,16	10,89	12,88	0,1342	0,1109	0,1313	0,1254	0,0824
40	2,60	2,20	2,60	98,1	13,16	10,89	13,16	0,1342	0,1109	0,1342	0,1264	0,1099
50	2,90	2,65	2,70	98,1	14,87	13,44	13,73	0,1515	0,1371	0,1399	0,1428	0,1374
60	3,15	2,30	2,70	98,1	16,29	11,45	13,73	0,1661	0,1168	0,1399	0,1409	0,1648



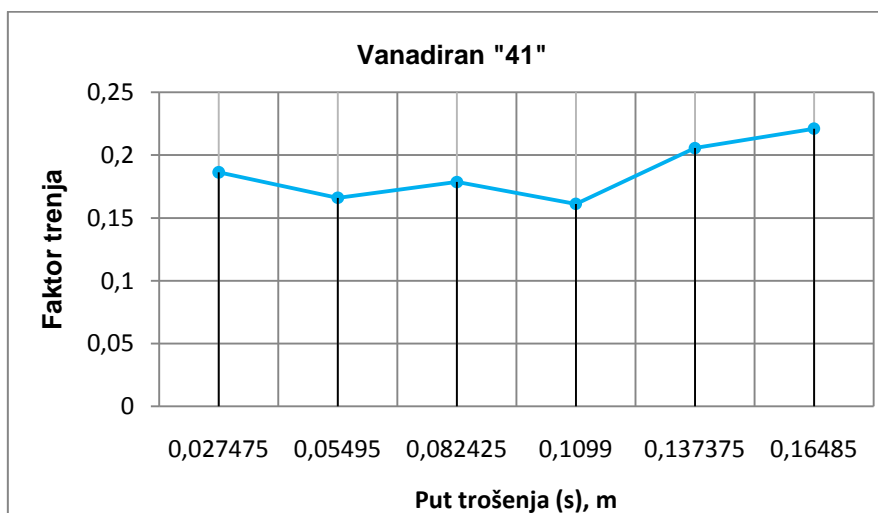
HT + Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 2 , uzorak "J"												
t, [s]	Broj mjerenja			F _n , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3									
10	2,65	2,50	3,20	98,1	13,45	12,59	16,57	0,1371	0,1283	0,1689	0,1448	0,0275
20	2,75	2,65	3,20	98,1	14,01	13,44	16,57	0,1428	0,1370	0,1689	0,1496	0,0549
30	2,75	2,75	3,45	98,1	14,01	14,01	17,99	0,1428	0,1428	0,1834	0,1564	0,0824
40	2,70	2,65	3,45	98,1	13,73	13,44	17,99	0,1399	0,1370	0,1834	0,1535	0,1099
50	3,05	2,90	3,70	98,1	15,72	14,87	19,42	0,1602	0,1515	0,1979	0,1699	0,1374
60	3,25	3,05	3,75	98,1	16,85	15,72	19,70	0,1718	0,1602	0,2008	0,1776	0,1648



Borirano , uzorak "31"												
t, [s]	Broj mjerenja			F _n , [N]	F _t , [N]			Faktor trenja			Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3		1	2	3	1	2	3		
10	3,05	2,80	2,80	98,1	15,72	14,29	14,29	0,1602	0,1457	0,1457	0,1506	0,0275
20	3,0	2,70	2,80	98,1	15,44	13,73	14,29	0,1573	0,1399	0,1457	0,1477	0,0549
30	3,0	2,70	2,70	98,1	15,44	13,73	13,73	0,1573	0,1399	0,1399	0,1457	0,0824
40	3,05	2,65	2,70	98,1	15,72	13,44	13,73	0,1602	0,1370	0,1399	0,1457	0,1099
50	2,95	2,70	2,70	98,1	15,15	13,73	13,73	0,1544	0,1399	0,1399	0,1448	0,1374
60	3,0	2,70	2,75	98,1	15,44	13,73	14,01	0,1573	0,1399	0,1428	0,1467	0,1648

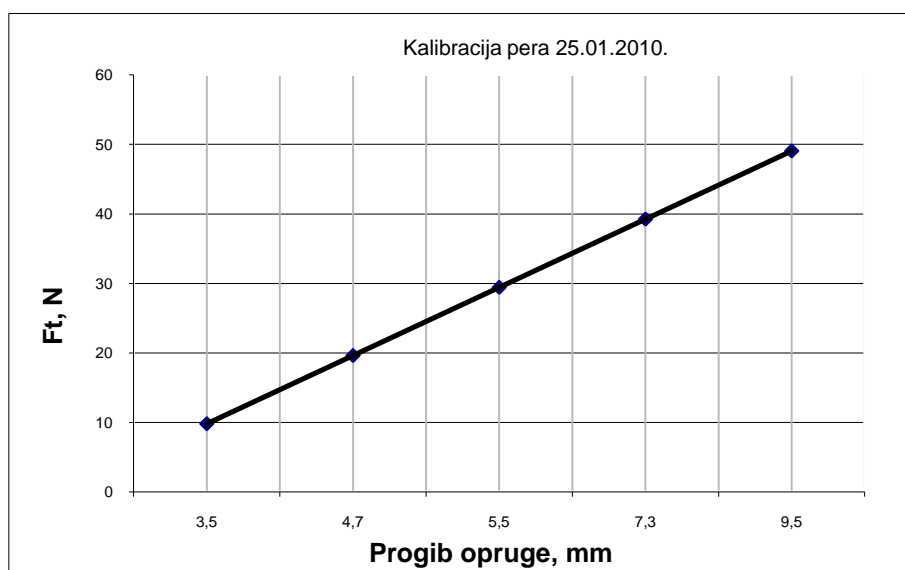


Vanadirano, uzorak "41"												
t, [s]	Broj mjerenja			F_n , [N]	F_t , [N]	F_t , [N]	F_t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3		1	2	3	1	2	3		
10	3,20	3,70	3,60	98,1	16,57	19,42	18,85	0,1689	0,1979	0,1921	0,1863	0,0275
20	2,80	3,25	3,40	98,1	14,29	16,86	17,71	0,1457	0,1718	0,1805	0,1661	0,0549
30	3,15	3,30	3,65	98,1	16,29	17,14	19,13	0,1661	0,1747	0,1950	0,1786	0,0824
40	2,90	3,10	3,20	98,1	14,87	16,01	16,57	0,1515	0,1631	0,1689	0,1612	0,1099
50	3,40	4,0	4,10	98,1	17,71	21,12	21,69	0,1805	0,2153	0,2211	0,2057	0,1374
60	3,60	4,20	4,50	98,1	18,85	22,26	23,97	0,1921	0,2269	0,2443	0,2211	0,1648

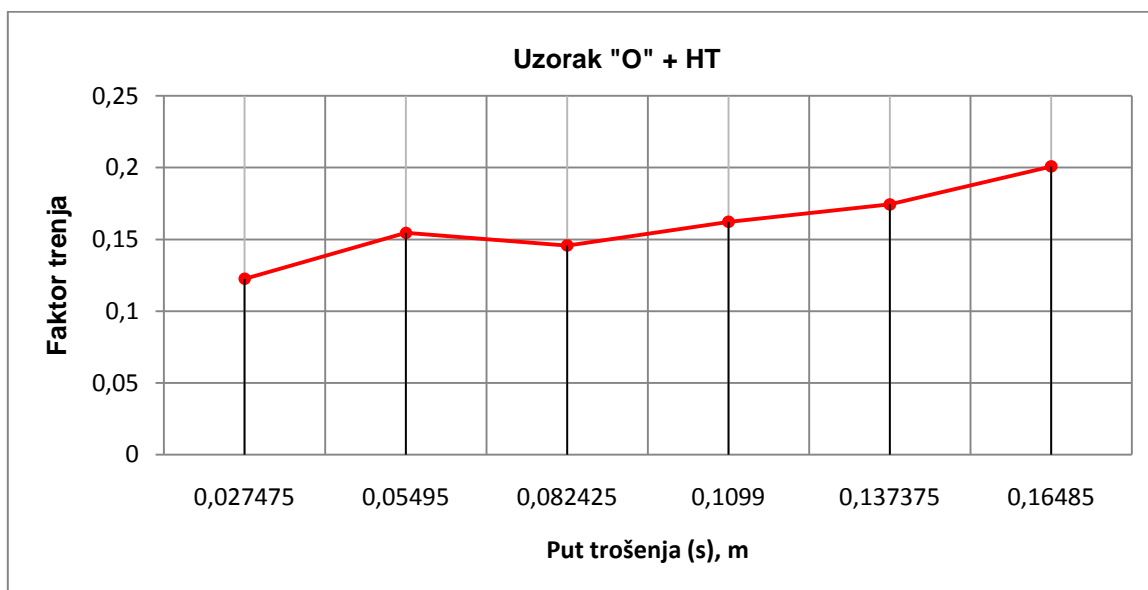


Baždarenje elastičnog pera nakon naknadnog poboljšavanja uzoraka: "O, 31, 41"

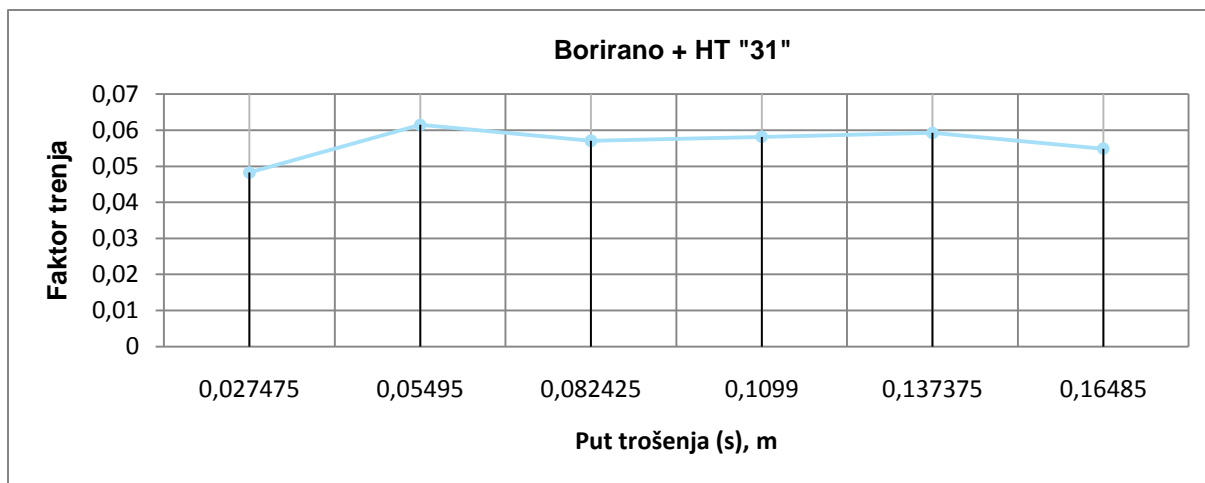
m, [kg]	$F_t = m \cdot 9,81$, [N]	ΔL , [mm]
1	9,81	3,5
2	19,62	4,7
3	29,43	5,5
4	39,24	7,3
5	49,05	9,5



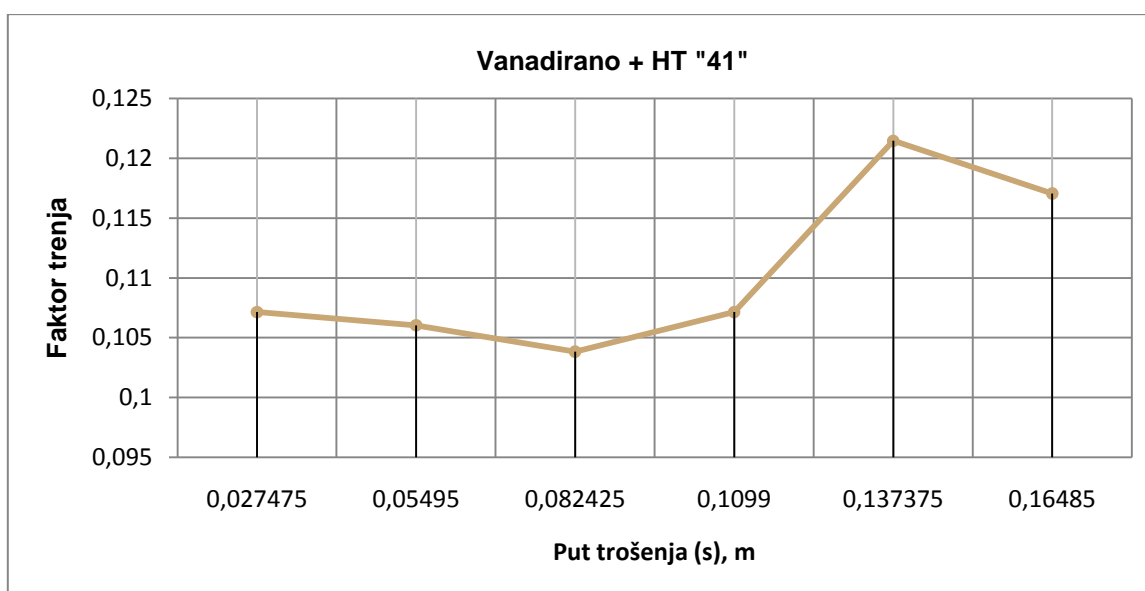
Uzorak "O" + HT													
t, [s]	Broj mjerenja				F _n , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3	4		1	2	3	1	2	3		
10	3,10	3,15	3,70	3,40	98,1	10,29	13,86	11,92	0,1049	0,1413	0,1215	0,1226	0,0275
20	3,10	3,40	4,10	4,20	98,1	11,92	16,46	17,10	0,1215	0,1677	0,1744	0,1545	0,0549
30	2,80	3,40	3,50	4,40	98,1	11,92	12,56	18,40	0,1215	0,1281	0,1876	0,1457	0,0824
40	3,10	3,15	4,40	4,50	98,1	10,29	18,40	19,05	0,1049	0,1876	0,1942	0,1622	0,1099
50	3,10	3,40	4,30	4,90	98,1	11,92	17,75	21,64	0,1215	0,1809	0,2206	0,1744	0,1374
60	3,15	4,40	4,80	4,60	98,1	18,40	20,99	19,69	0,1876	0,2140	0,2008	0,2008	0,1648



Borirano + HT "31"													
t, [s]	Broj mjerenja				F _n , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	F _t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3	4		1	2	3	1	2	3		
10	0,70	1,50	0,30	0,30	98,1	5,59	0,41	8,19	0,057	0,004	0,084	0,04825	0,0275
20	0,20	1,20	0,50	0,20	98,1	8,84	2,35	6,89	0,090	0,024	0,070	0,06147	0,0549
30	0,40	1,20	0,50	0,45	98,1	7,54	2,35	6,89	0,077	0,024	0,070	0,05706	0,0824
40	0,30	1,30	0,45	0,20	98,1	8,19	1,71	7,22	0,084	0,017	0,074	0,05817	0,1099
50	0,60	1,0	0,40	0,35	98,1	6,25	3,65	7,54	0,064	0,037	0,077	0,05927	0,1374
60	0,30	1,30	0,60	0,40	98,1	8,19	1,71	6,25	0,084	0,017	0,064	0,05486	0,1648



Vanadirano + HT "41"													
t, [s]	Broj mjerenja				F_n , [N]	F_t , [N]	F_t , [N]	F_t , [N]	Faktor trenja	Faktor trenja	Faktor trenja	Srednji faktor trenja	Put trošenja s, [mm]
	1	2	3	4		1	2	3	1	2	3		
10	0,70	1,50	0,30	0,30	98,1	11,59	9,97	9,97	0,1182	0,1016	0,1016	0,1071	0,0275
20	0,20	1,20	0,50	0,20	98,1	10,62	10,29	10,29	0,1082	0,1049	0,1049	0,1060	0,0549
30	0,40	1,20	0,50	0,45	98,1	10,29	9,97	10,29	0,1049	0,1016	0,1049	0,1038	0,0824
40	0,30	1,30	0,45	0,20	98,1	10,29	10,29	10,94	0,1049	0,1049	0,1115	0,1071	0,1099
50	0,60	1,0	0,40	0,35	98,1	12,24	11,59	11,92	0,1248	0,1182	0,1215	0,1215	0,1374
60	0,30	1,30	0,60	0,40	98,1	11,92	11,92	10,62	0,1215	0,1215	0,1082	0,1171	0,1648



Prilog 3. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje adhezijom (Svjetlosni mikroskop)

Uzorak						
Širina traga trošenja, μm	O	17	E	J	31	41
	207,62	498,88	447,24	405,04	454,99	252,61
	219,88	533,69	436,35	371,68	410,98	232,18
	223,28	503,06	469,71	382,57	423,11	256,73
	431,58	497,62	491,79	544,59	395,96	433,04
	460,86	511,23	491,68	552,07	422,19	360,22
	455,41	501,02	510,06	539,82	441,25	394,33
	407,08	485,36	606,51	535,74	410,55	296,28
	408,44	509,87	562,27	525,53	450,73	275,00
	413,89	521,44	571,24	482,96	424,13	307,86
Xsr	358,67	506,91	509,65	482,22	425,99	312,03

UZORAK "O" – Toplinski neobrađeno

UZORAK "17" – HT + Nitrokarburirano Tenifer

UZORAK "E" – HT + Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 1

UZORAK "J" – HT + Nitrokarburirano Tenifer – QPQ 2

UZORAK "31" - Borirano

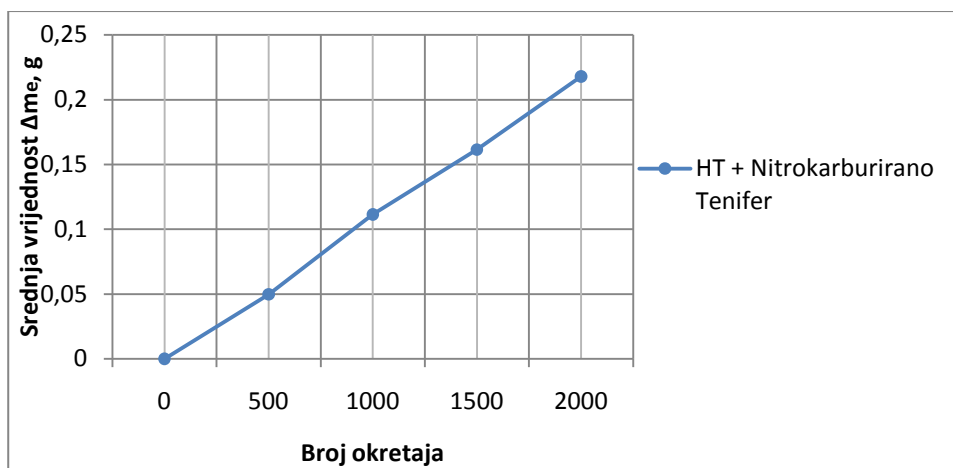
UZORAK "41" - Vanadirano

Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje adhezijom nakon naknadnog HT (Svjetlosni mikroskop)

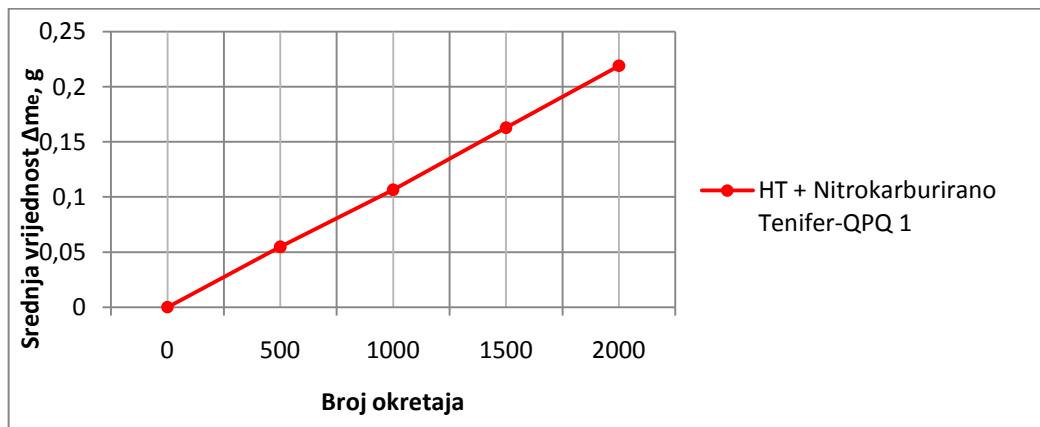
Uzorak			
Širina traga trošenja, μm	O	31	41
	502,38	382,57	547,99
	452,01	400,95	535,74
	467,66	417,29	452,01
	336,28	349,22	422,05
	270,25	415,25	567,73
	295,44	354,66	515,31
	513,27	511,91	424,10
	511,91	513,27	454,05
	467,66	490,81	528,93
Xsr	424,09	426,21	494,21

Prilog 4. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje abrazijom

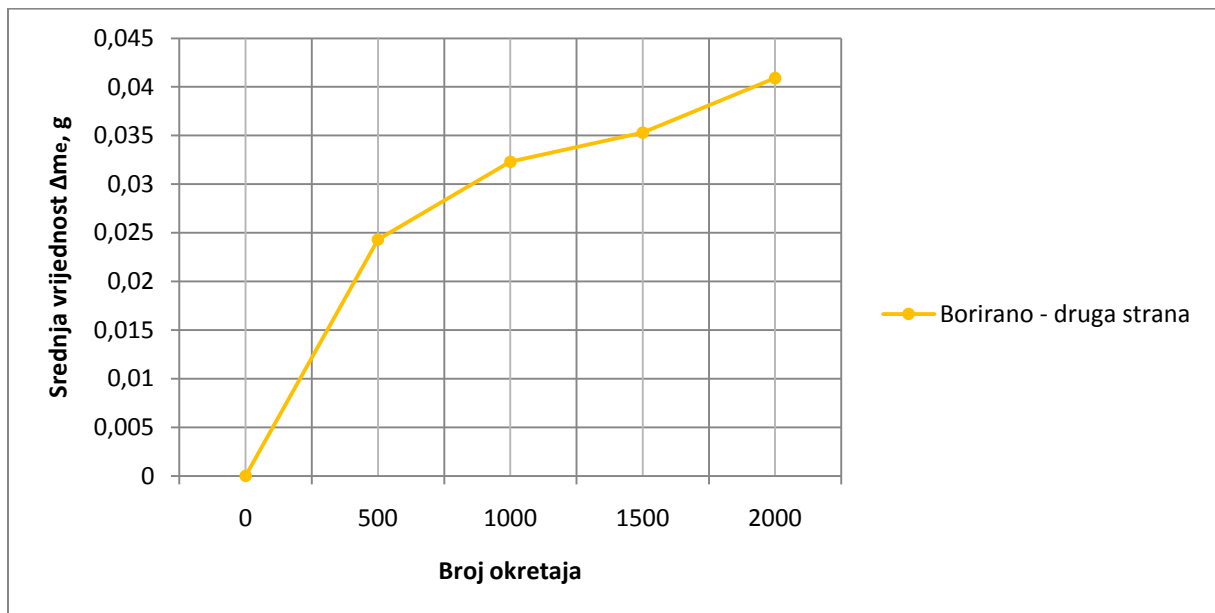
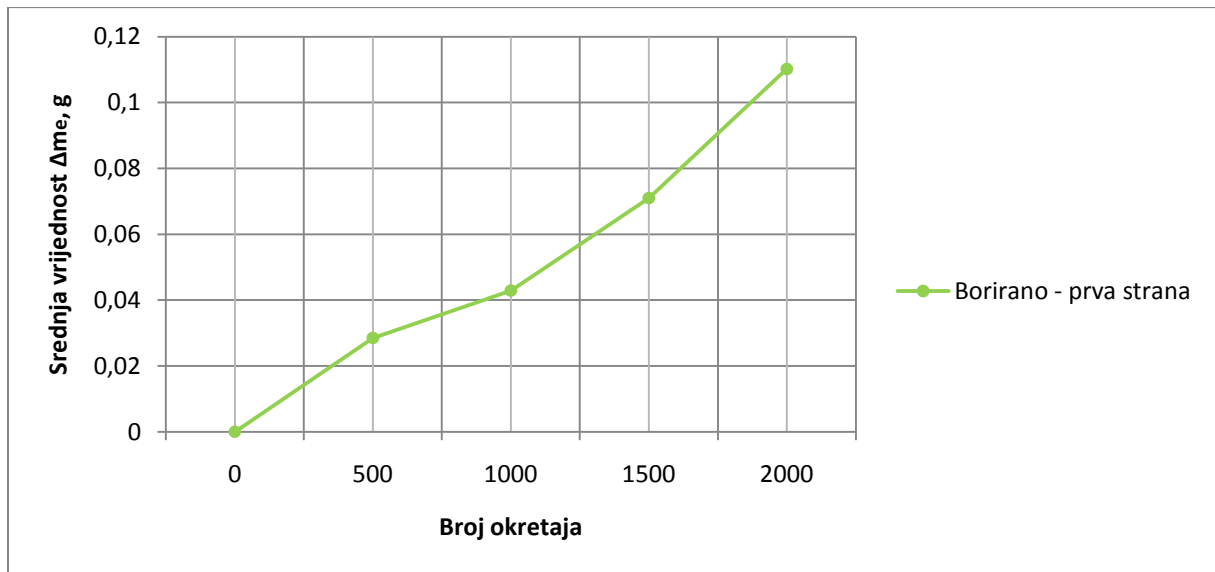
HT + Nitrokarburirani Tenifer uzorak "17"								
Prva strana				Druga strana				$\Delta m_{e_{sr}}$, g
Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g	Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g	
0	48,6803	0	0	0	48,4580	0	0	0
500	48,6295	0,0508	0,0508	500	48,4094	0,0486	0,0486	0,0497
1000	48,5650	0,0645	0,1153	1000	48,3505	0,0589	0,1075	0,1114
1500	48,5132	0,0518	0,1671	1500	48,3020	0,0485	0,1560	0,1615
2000	48,4580	0,0552	0,2223	2000	48,2445	0,0575	0,2135	0,2179



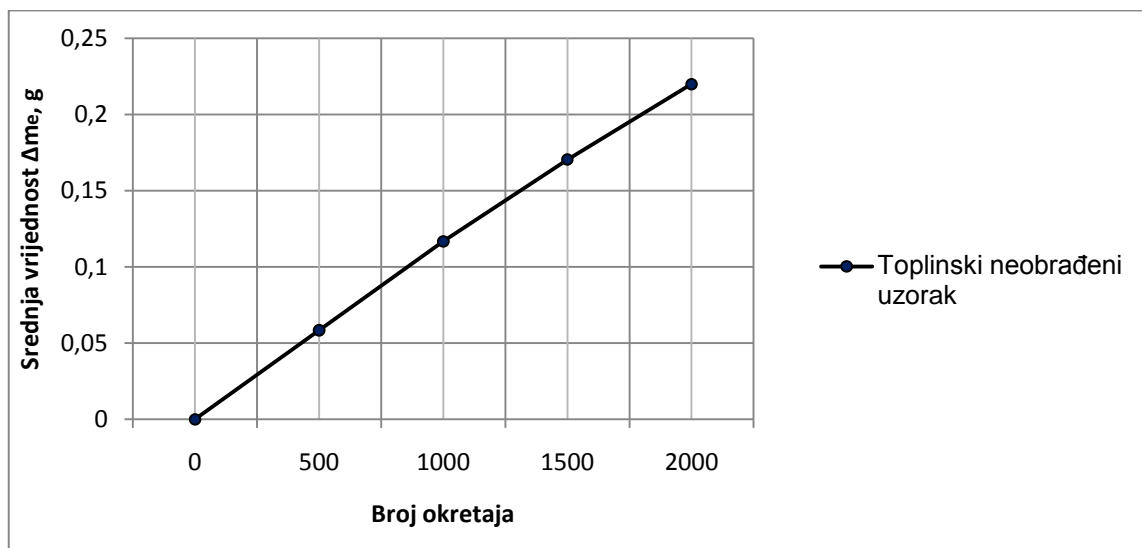
HT + Nitrokarburirani Tenifer-QPQ uzorak "2"								
Prva strana				Druga strana				$\Delta m_{e_{sr}}$, g
Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g	Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g	
0	67,6040	0	0	0	67,3787	0	0	0
500	67,5480	0,0560	0,0560	500	67,3250	0,0537	0,0537	0,0548
1000	67,5004	0,0476	0,1036	1000	67,2693	0,0557	0,1094	0,1065
1500	67,4328	0,0676	0,1712	1500	67,2241	0,0452	0,1546	0,1629
2000	67,3787	0,0541	0,2253	2000	67,1659	0,0582	0,2128	0,2191



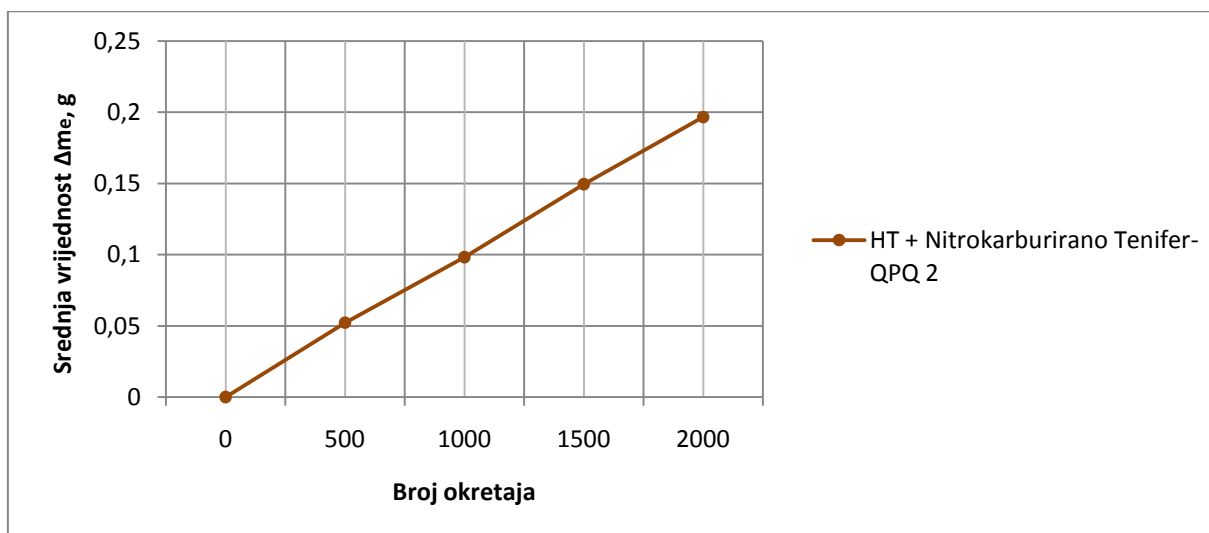
Borirani uzorak "31"							
Prva strana				Druga strana			
Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g	Broj okretaja	Masa uzorka, g	Δm , g	Δm_e , g
0	54,8225	0	0	0	54,7123	0	0
500	54,7940	0,0285	0,0285	500	54,6880	0,0243	0,0243
1000	54,7796	0,0144	0,0429	1000	54,6800	0,0080	0,0323
1500	54,7515	0,0281	0,0710	1500	54,6770	0,0030	0,0353
2000	54,7123	0,0392	0,1102	2000	54,6714	0,0056	0,0409



Toplinski neobrađeno, uzorak "O"								
Prva strana				Druga strana				$\Delta m_{e_{sr}}, g$
Broj okretaja	Masa uzorka, g	$\Delta m, g$	$\Delta m_e, g$	Broj okretaja	Masa uzorka, g	$\Delta m, g$	$\Delta m_e, g$	
0	68,3850	0	0	0	68,1573	0	0	0
500	68,3246	0,0604	0,0604	500	68,1007	0,0566	0,0566	0,0585
1000	68,2654	0,0592	0,1196	1000	68,0432	0,0575	0,1141	0,1168
1500	68,2128	0,0526	0,1722	1500	67,9885	0,0547	0,1688	0,1705
2000	68,1573	0,0555	0,2277	2000	67,9450	0,0435	0,2123	0,22



HT + Nitrokarburirani Tenifer-QPQ uzorak "J"								
Prva strana				Druga strana				$\Delta m_{e_{sr}}, g$
Broj okretaja	Masa uzorka, g	$\Delta m, g$	$\Delta m_e, g$	Broj okretaja	Masa uzorka, g	$\Delta m, g$	$\Delta m_e, g$	
0	67,5154	0	0	0	67,3146	0	0	0
500	67,4610	0,0544	0,0544	500	67,2645	0,0501	0,0501	0,05225
1000	67,4125	0,0485	0,1029	1000	67,2210	0,0435	0,0936	0,09825
1500	67,3621	0,0504	0,1533	1500	67,1690	0,0520	0,1456	0,14945
2000	67,3146	0,0475	0,2008	2000	67,1223	0,0467	0,1923	0,19655

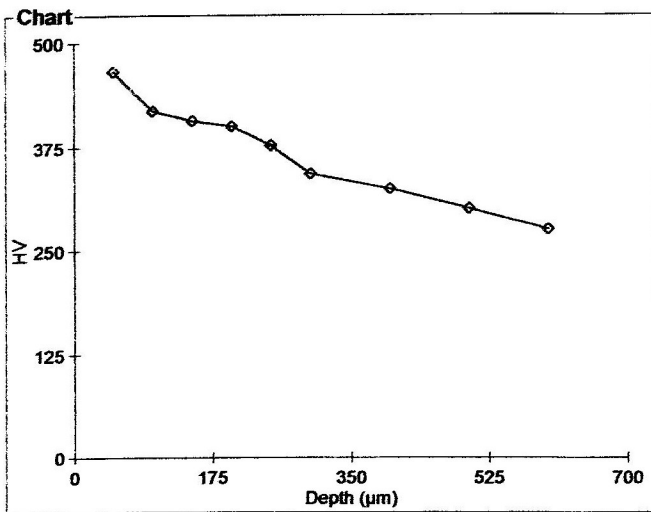


Organization: FSB Zagreb
 User: ss
 U 17 tenifer

Department: Katedra za toplinsku obradbu
 Date & Time: 2/4/2010 1:00 PM

niz 1

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
 Dwell Time: 10 sec. Magnification: 200x



Sample Statistics

Minimum: 276 HV
 Maximum: 467 HV
 Mean: 369 HV
 Std Deviation: 62 HV
 Count: 9 of 9

Chart Values

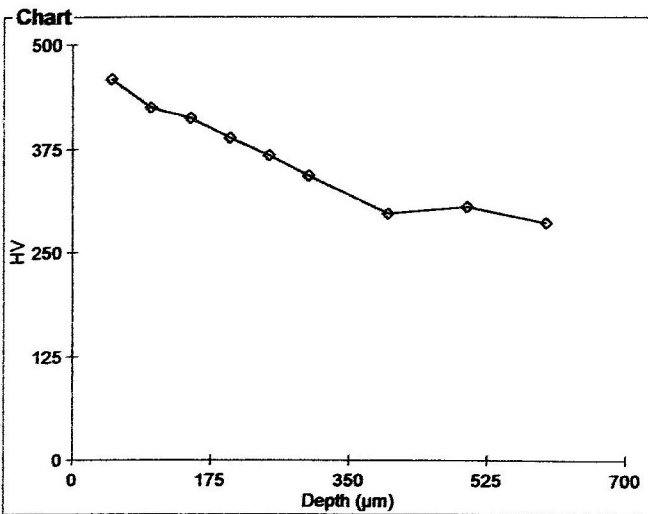
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	467	50.0	27.3	29.1
2	419	100.0	29.1	30.4
3	407	150.0	30.0	30.4
4	401	200.0	30.4	30.4
5	378	250.0	30.9	31.8
6	343	300.0	33.1	32.7
7	325	400.0	33.6	34.0
8	301	500.0	34.9	35.3
9	276	600.0	36.2	37.1

Organization: FSB Zagreb
 User: ss
 U 17 tenifer

Department: Katedra za toplinsku obradbu
 Date & Time: 2/4/2010 1:34 PM

niz 2

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
 Dwell Time : 10 sec. Magnification: 200x



Sample Statistics

Minimum: 286 HV
 Maximum: 459 HV
 Mean: 365 HV
 Std Deviation: 62 HV
 Count: 9 of 9

Chart Values

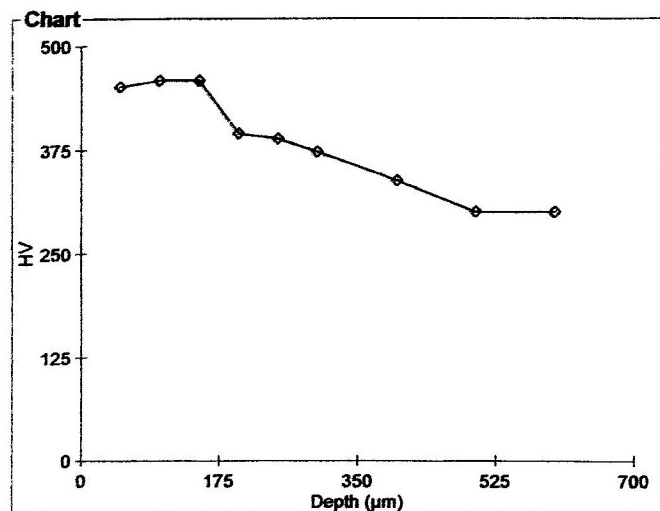
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	459	50.0	28.6	28.2
2	425	100.0	29.5	29.5
3	413	150.0	30.0	30.0
4	389	200.0	30.9	30.9
5	368	250.0	31.8	31.8
6	343	300.0	32.7	33.1
7	297	400.0	36.7	34.0
8	305	500.0	34.9	34.9
9	286	600.0	36.2	35.8

Organization: **FSB Zagreb**
User: **ss**
U 2 tenifer QPQ

Department: **Katedra za toplinsku obradbu**
Date & Time: **2/4/2010 12:39 PM**

niz 1

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Dwell Time : 10 sec. Magnification: 200x

**Sample Statistics**

Minimum: 301 HV
Maximum: 459 HV
Mean: 385 HV
Std Deviation: 63 HV
Count: 9 of 9

Chart Values

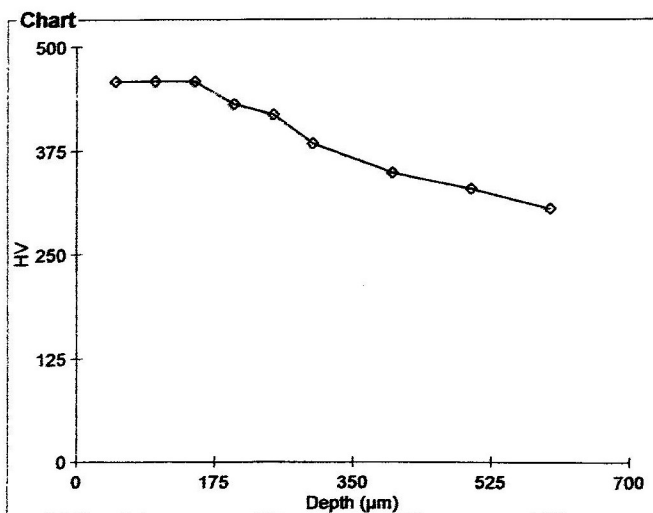
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	452	50.0	29.1	28.2
2	459	100.0	28.2	28.6
3	459	150.0	28.6	28.2
4	395	200.0	30.9	30.4
5	389	250.0	30.9	30.9
6	373	300.0	31.8	31.3
7	338	400.0	33.1	33.1
8	301	500.0	34.9	35.3
9	301	600.0	34.9	35.3

Organization: FSB Zagreb
User: ss
U 2 tenifer QPQ

Department: Katedra za toplinsku obradbu
Date & Time: 2/4/2010 12:53 PM

niz 2

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Dwell Time: 10 sec. Magnification: 200x

**Sample Statistics**

Minimum: 305 HV
Maximum: 459 HV
Mean: 399 HV
Std Deviation: 60 HV
Count: 9 of 9

Chart Values

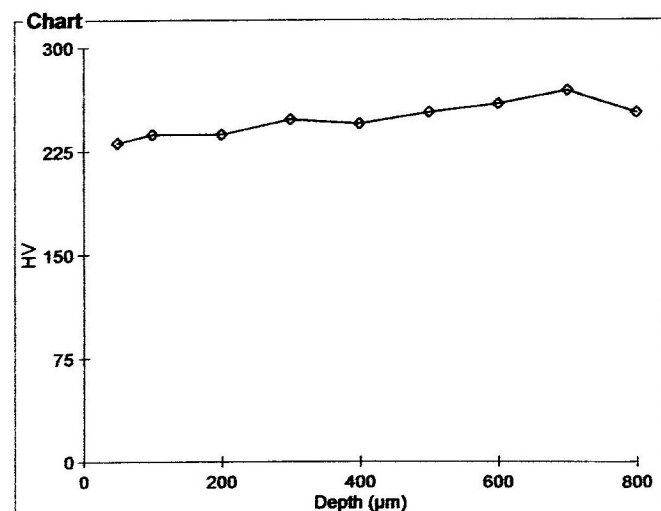
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	459	50.0	28.2	28.6
2	459	100.0	28.6	28.2
3	459	150.0	28.6	28.2
4	432	200.0	29.5	29.1
5	419	250.0	29.5	30.0
6	384	300.0	30.9	31.3
7	348	400.0	32.7	32.7
8	329	500.0	34.0	33.1
9	305	600.0	34.9	34.9

Organization: FSB Zagreb
User: ss
vanadirano

Department: Katedra za toplinsku obradbu
Date & Time: 2/4/2010 3:06 PM

niz1

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Dwell Time : 10 sec. Magnification: 200x



Sample Statistics

Minimum: 231 HV
Maximum: 269 HV
Mean: 248 HV
Std Deviation: 12 HV
Count: 9 of 9

Chart Values

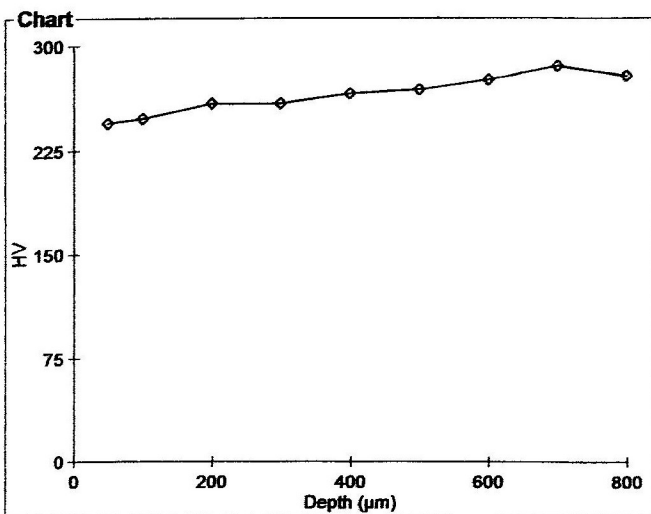
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	231	50.0	39.8	40.3
2	237	100.0	39.4	39.8
3	237	200.0	39.4	39.8
4	248	300.0	38.5	38.9
5	245	400.0	38.5	39.4
6	253	500.0	37.6	38.9
7	259	600.0	38.0	37.6
8	269	700.0	36.7	37.6
9	253	800.0	37.6	38.9

Organization: **FSB Zagreb**
 User: **ss**
vanadirano

Department: **Katedra za toplinsku obradbu**
 Date & Time: **2/4/2010 3:44 PM**

niz2

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
 Dwell Time : 10 sec. Magnification: 200x



Sample Statistics

Minimum: 245 HV
 Maximum: 286 HV
 Mean: 265 HV
 Std Deviation: 14 HV
 Count: 9 of 9

Chart Values

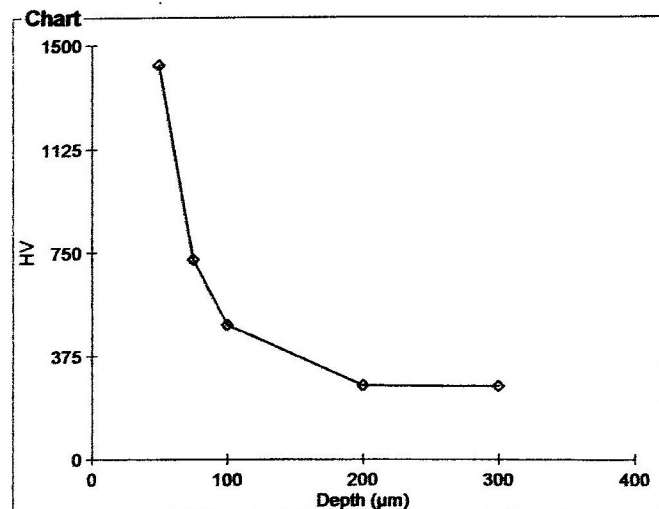
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	245	50.0	39.4	38.5
2	248	100.0	38.5	38.9
3	259	200.0	38.0	37.6
4	259	300.0	38.0	37.6
5	266	400.0	37.6	37.1
6	269	500.0	37.1	37.1
7	276	600.0	36.7	36.7
8	286	700.0	36.2	35.8
9	279	800.0	36.2	36.7

Organization: FSB Zagreb
User: ss
borirano

Department: Katedra za toplinsku obradbu
Date & Time: 2/4/2010 2:40 PM

niz 1

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Dwell Time: 10 sec. Magnification: 200x

**Sample Statistics**

Minimum: 266 HV
Maximum: 1429 HV
Mean: 636 HV
Std Deviation: 482 HV
Count: 5 of 5

Chart Values

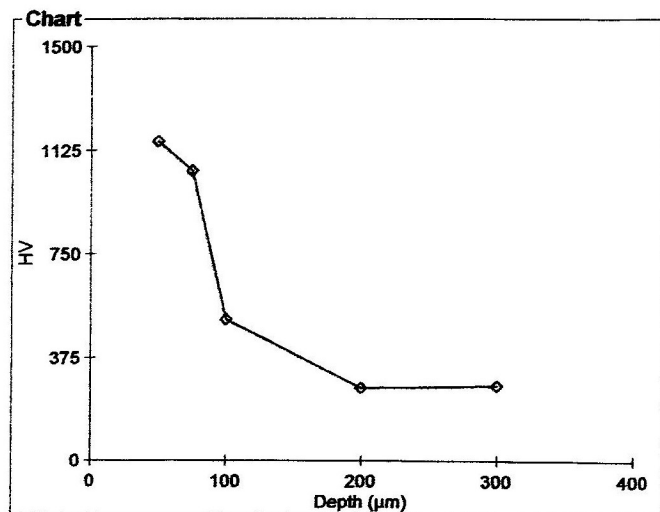
Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	1429	50.0	14.3	17.9
2	726	75.0	22.8	22.4
3	490	100.0	27.7	27.3
4	269	200.0	36.2	38.0
5	266	300.0	37.1	37.6

Organization: FSB Zagreb
User: ss
borirano

Department: Katedra za toplinsku obradbu
Date & Time: 2/4/2010 2:50 PM

niz 2

Force: 200 gf Calibration: 0.4474 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Dwell Time: 10 sec. Magnification: 200x

**Sample Statistics**

Minimum: 266 HV
Maximum: 1158 HV
Mean: 652 HV
Std Deviation: 426 HV
Count: 5 of 5

Chart Values

Field #	Hardness HV	Depth μm	H Diag. μm	V Diag. μm
1	1158	50.0	17.9	17.9
2	1050	75.0	18.8	18.8
3	515	100.0	27.3	26.4
4	266	200.0	36.7	38.0
5	272	300.0	36.7	37.1